



МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ



#КИМО2024

13 - 17 мая 2024

УДК 551.46

ББК 26.221

К 63

Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Владивосток, 13–17 мая 2024 г. Владивосток: Приморский океанариум – филиал Национального научного центра морской биологии ДВО РАН, 2024, 637 с. DOI:10.29006/978-5-6045110-3-9.

ISBN 978-5-6045110-3-9.

В сборнике представлены материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана» (КИМО-2024), посвященной обсуждению основных научных достижений и открытий молодых специалистов в области изучения Мирового океана. В рамках конференции рассматривались вопросы современной океанологии по секциям: физика океана, биология океана, морская геология и геофизика, химия и биогеохимия океана, физико-биологические исследования океана, экология моря и рациональное природопользование, океанологическая техника и приборостроение.

Редколлегия: д.б.н. чл.-корр. РАН Долматов И.Ю., к.б.н., доцент Шевченко О.Г., к.б.н. Баяндина Ю.С., к.г.н. Босин А.А., к.г.-м.н. Будько Д.Ф., к.ф.-м.н. Будянский М.В., к.ф.-м.н. Буланов А.В., к.г.н. Василенко Ю.П., к.г.н. Жданов И.А., д.г.н. Зимин А.В., к.ф.-м.н. Каплуненко Д.Д., к.г.н. Кивва К.К., к.б.н. Кладченко Е.С., к.б.н. Колючкина Г.А., к.г.н. Коник А.А., к.т.н. Коноплин А.Ю., к.г.н. Котловская Е.В., к.ф.-м.н. Крикун В.А., д.ф.-м.н. Кубряков А.А., к.г.н. Курносова А.С., к.ф.-м.н. Липинская Н.А., к.г.н. Лобанова П.В., к.б.н. Лобус Н.В., к.г.н. Май Р.И., д.ф.-м.н. Макаров Д.В., к.г.-м.н. Мальцева Е.В., к.ф.-м.н. Мысленков С.А., Назарова А.А., к.г.н. Пичугин М.К., к.г.н. Погожева М.П., к.ф.-м.н. Подрезова Н.А., д.т.н. Родионов А.Ю., к.г.н. Рубчентя А.В., Салахов Д.О., к.г.н. Свергун Е.И., к.г.-м.н. Сырбу Н.С., к.ф.-м.н. Салюк П.А., к.ф.-м.н. Файман П.А., к.б.н. Хабибулина В.Р., Холмогоров А.О., к.б.н. Челебиева Э.С., к.б.н. Шульгина М.А., к.ф.-м.н. Юровская М.В., к.ф.-м.н. Юшманова А.В., Якимов Т.С.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Разработка оригинального макета обложки – Корниенко М.А. (Приморский океанариум – филиал ННЦМБ ДВО РАН)

ISBN: 978-5-6045110-3-9

© ННЦМБ ДВО РАН, 2024

Complex Investigations of the World Ocean. Proceedings of the VIII Russian Scientific Conference of Young Scientists, Vladivostok, May 13–17, 2024 Vladivosyok: Svoe izdatel'stvo, 2024, 637 p.

ISBN 978-5-4386-2269-7

The conference proceedings presents extended abstracts of the participants of the VIII all-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Complex Investigations of the World Ocean" (CIWO-2024) dedicated to the discussion of the main scientific achievements and discoveries of young specialists in the oceanology fields. Within the framework of the conference, issues of modern oceanology were considered in eight sections: Ocean Physics, Ocean Biology, Marine Geology and Geophysics, Ocean Chemistry and Biogeochemistry, Physical and Biological Research of the Ocean, Marine Ecology and Environmental Management, Oceanological Technology and Instrumentation.

Editorial board: Dr. Dolmatov I.Yu., PhD Shevchenko O.G., PhD Bayandina Y.S., PhD Bosin A.A., PhD Budko D.F. PhD Budyansky M.V., PhD Bulanov A.V., PhD Vasilenko Yu.P., PhD Zhdanov I.A., Dr. Zimin A.V., PhD Kaplunenko D.D., PhD Kivva K.K., PhD Kladchenko E.C., PhD Kolyuchkina G.A., PhD Konik A.A., PhD Konoplin A.Yu., PhD Koltovskaya E.V., PhD Krikun V.A., Dr. Kubryakov A.A., PhD Kurnosova A.S., PhD Lipinskaya N.A., PhD Lobanova P.V., PhD Lobus N.V., PhD May R.I., Dr. Makarov D.V., PhD Maltseva E.V., PhD Myslenkov S.A., Nazarova A.A., PhD Pichugin M.K., PhD Pogozhaeva M.P., PhD Podrezova N.A., PhD Salyuk P.A., PhD Fayman P.A., PhD Khabibulina V.R., Kholmogorov A.O., PhD Chelebieva E.C., PhD Shulgina M.A., PhD Yurovskaya M.V., PhD Yushmanova A.V., Yakimov T.S.

Materials are published in the author's edition

Development of an original cover layout – Kornienko M.A. (Primorsky Aquarium FEB RAS)

Содержание

СЕКЦИЯ «ФИЗИКА ОКЕАНА»	31
Адамовская П.О., Осадчиев А.А., Мысленков С.А. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ВЕРХНЕГО ПЕРЕМЕШАНОГО СЛОЯ В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА .	31
Недурובה А.А., Айлуру С.И., Григорьев Т.А., Вановский В.В. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ СНИМКОВ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	33
Алояров Р.М., Тюренкова А.Е., Морозов В.Е. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ В ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТЕ ЧЕРНОГО МОРЯ В 2023-2024 ГГ.	35
Ангудович Я.И., Малинин В.Н. ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ОКЕАНА И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ С ЦИРКУЛЯЦИЕЙ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ	37
Антонов В.А., Долгих С.Г. ГРАВИТАЦИОННОЕ И ИНФРАГРАВИТАЦИОННОЕ МОРСКОЕ ВОЛНЕНИЕ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПРИБОРОВ	39
Иванов В.А., Антюфриева Л.А., Вановский В.В. СТАТИЧЕСКОЕ УСВОЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ	41
Атаджанова О.А., Козлов И.Е., Коник А.А., Плотников Е.В., Медведева А.В. ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА ВБЛИЗИ ОСТРОВА НАДЕЖДЫ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ .	43
Ахтамьянов Р.А., Гладских Д.С., Мортиков Е.В. ПРИМЕНИМОСТЬ ОДНОМЕРНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ	45
Ахтямова А.Ф., Новиков М.О., Сухих Н.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОГО ЛЬДА НА ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН	47
Багатинская В.В., Багатинский В.А., Морозов Е.Г., Дианский Н.А. ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ КУПОЛА ГЛУБИННОЙ ВОДЫ МОРЯ УЭДЕЛЛА	49
Багатинский В.А., Багатинская В.В., Дианский Н.А., Гусев В.А., Морозов Е.Г. ГЕОСТРОФИЧЕСКАЯ И ВЕТРОВАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ	51
Бараненкова В.Д., Подрезова Н.А. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ . .	53

Безделева А.А., Стасюк Е.И. ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА О. САХАЛИН	55
Благодатских Е.А., Зимин А.В., Козлов И.Е. ВИХРИ, ТРАССИРУЕМЫЕ ЛЬДОМ В ОБЛАСТИ ПРИКРОМОЧНОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД	57
Боджона С.Д., Сидоров Д.Д., Луньков А.А. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВОГО ПОЛЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА МЕЛКОВОДНОМ УЧАСТКЕ В КАРСКОМ МОРЕ	59
Болсуновский М.А., Долгих Г.И., Чупин В.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЯВЛЕНИЕМ «ГОЛОС МОРЯ», ВОЗНИКАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ТАЙФУНОВ ЧЕРЕЗ ЯПОНСКОЕ МОРЕ	61
Бородина А.П., Голубева Е.Н., Огородников Д.М. МОНИТОРИНГ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ АКВАТОРИИ ПЛЯЖА УНИВЕРСИТЕТСКОЙ НАБЕРЕЖНОЙ ДВФУ (БУХТА АЯКС) ЗА 2023-2024 ГГ.	62
Бугук Г.М., Май Р.И. ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ СТАРЫХ ЛЬДОВ НА ТРАССАХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ	64
Булавинова В.И., Будянский М.В., Белоненко Т.В., Дидов А.А. ЭВОЛЮЦИЯ ИТУРУПСКОГО АНТИЦИКЛОНА В КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЕ ПО СПУТНИКОВЫМ, МОДЕЛЬНЫМ И IN SITU ДАННЫМ	65
Буланов А.В. ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИСКРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ	67
Вановский В.В., Григорьев Т.А., Иванов В.А., Явич Н.Б., Чесноков А.А., Дрозд И.Д., Голиков В.А., Марченко А.С., Бурнаев Е.В., Вереземская П.С., Гавриков А.В., Криницкий М.А., Шармар В.Д., Гулев С.К. “БОРЕЙ” – ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С ЭЛЕМЕНТАМИ ИИ ДЛЯ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РЕГИОНЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ	69
Виноградов М.В., Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Сухачёв В.Н. ОСОБЕННОСТИ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В КОНЦЕ XX - НАЧАЛЕ XXI ВЕКА	71
Галаева А.В., Ивкина Н.И., Наурызбаева Ж.К., Долгих С.А. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ПОРТА АКТАУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ БУДУЩЕГО КЛИМАТА ДО 2055 ГОДА	73

Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Аглова Е.А., Глуховец Д.И., Родионов М.А. АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА РЕГРЕССИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ГИДРООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ПАРАМЕТРАМИ ЛИДАРНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ	75
Гмыря Е.И., Чубаренко Б.В. ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ПО ДАННЫМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ В РЕКЕ ПРЕГОЛЕ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ БАЛТИКА)	77
Гренкин Г.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	79
Гармашов А.В., Марюшкин Ю.А., Шокуров М.В., Гуров К.И. "ШТОРМ ВЕКА" 26 НОЯБРЯ 2023 Г. В ЧЕРНОМ МОРЕ: ПРОГНОЗ И ИЗМЕРЕНИЯ .	81
Дегтяр Алексей Дмитриевич ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МОРСКИХ ОСАДКОВ	83
Демченко А.Ю., Башмачников И.Л., Будянский М.В. РЕЦИРКУЛЯЦИЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ПРОЛИВЕ ФРАМА	85
Дешова Д.В., Гордеева С.М., Аверкиев А.С. РОЛЬ АТМОСФЕРЫ В ТЕПЛОВОМ БАЛАНСЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ	87
Джамалова А.Г., Малыгин Е.Ю. ОСОБЕННОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БЕРИНГОВА МОРЯ ОСЕНЬЮ 2023 ГОДА	89
Диденкулова Е.Г., Чугунов В.Е., Мельников И.Е. БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ	91
Дидов А.А., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Файман П.А. 3D+1 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ .	93
Евстигнеева Н.А., Демьшев С.Г., Дымова О.А. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ СЕЗОН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГОДА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 2016 И 2017 ГГ.	95
Егорова Е.С., Миронов Е.У. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ НА МОМЕНТ ИХ МАКСИМАЛЬНОГО НАРАСТАНИЯ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА	97
Ежкова А.А., Оноприенко В.А., Благодатских Д.В., Яковлев Н.Г. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СХЕМЫ С КОРРЕКЦИЕЙ ПОТОКОВ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ЛЬДА В МОДЕЛИ INMOSEAN	99

Елкин Д.Н., Зацепин А.Г. РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНОГО ХРЕБТА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО БЕТА-ЭФФЕКТА	101
Ермошкин А.В. ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОПЛЕРОВСКОЙ МОРСКОЙ СВЧ РАДИОЛОКАЦИИ	103
Жук В.Р., Кубряков А.А. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВЫХ ТРЕЩИН В ЧУКОТСКОМ МОРЕ ПО МУЛЬТИСЕНСОРНЫМ ДАННЫМ	105
Журбас Н.В., Лыжков Д.А., Кузьмина Н.П. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ЕВРАЗИЙСКОМ БАССЕЙНЕ АРКТИКИ И ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ НА ОСНОВЕ STD-ДАННЫХ (ПРОГРАММА NAVOS, РАЗРЕЗ «POLARSTERN-96»)	106
Забудкина З.В., Осадчий А.А., Фрей Д.И. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ВЕТВИ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ МАСС В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ	108
Захарова Е.В., Фомин В.В., Дианский Н.А. ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛТИЙСКОГО МОРЯ МОДЕЛЮ ИНМОМ ЗА ПЕРИОД 2012-2021 ГГ.	110
Зуев О.А., Селиверстова А.М., Фрей Д.И. ПРИДОННЫЙ ПЛОТНОСТНОЙ ПОТОК В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ РАЗЛОМА ВИМА	111
Иванов М.П., Долгих С.Г. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ УБЫВАЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ	113
Игнатьев Д.Е., Гордеева С.М. КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ ЧЕРЕЗ БЕРИНГОВ ПРОЛИВ.	114
Каледина А.С., Башмачников И.Л., Будянский М.В., Улейкий М.Ю. АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОД ГРЕНЛАНДСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА	116
Каледина А.С., Семкин П.Ю. СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЫ И ЗАЛИВА ШЕЛИХОВА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД	118
Калужный Д.С., Соколов Д.Д., Горячев В.А. ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{137}Cs В ВОДАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ЗИМОЙ 2022 И ЛЕТОМ 2023 ГОДА	120

Козлов И.Е. КИНЕМАТИКА ВНУТРЕННИХ ВОЛН ВБЛИЗИ ПРИКРОМОЧНОЙ ЛЕДОВОЙ ЗОНЫ В АРКТИКЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	122
Козлов И.Е., Коржуев В.А., Павлов М.И., Зубов А.Г. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ПО ДАННЫМ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЕТОМ 2023 Г.	124
Коник А.А., Осадчиев А.А. ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЛЮМА РЕКИ ИОКАНГА ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ	126
Копышов И.О., Козлов И.Е., Новиков Б.А., Ширыборова А.И. СТРУКТУРА ПОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	128
Копышов И.О., Козлов И.Е., Свергун Е.И., Зимин А.В. ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА	129
Коробченкова К.Д., Кречик В.А., Ульянова М.О. ФОРМИРОВАНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ЗОН В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. ПРЕГОЛЯ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ)	131
Коршенко Е.А., Панасенкова И.И., Осадчиев А.А., Белякова П.А., Фомин В.В. СЕЗОННАЯ И СИНОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМОВ МАЛЫХ РЕК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ	133
Кошкина В.С., Гавриков А.В. КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ	135
Кошкина В.С., Гавриков А.В. ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВОЗЕМЕЛЬСКОЙ БОРЫ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	137
Крайнова М.С., Булгаков К.Ю., Багно С.С. ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД МОРЕМ	139
Криницкий М.А., Голиков В.А., Резвов В.Ю., Гавриков А.В., Суслов А.И., Борисов М.А., Тилинина Н.Д., ОЦЕНКА ЗНАЧИМОЙ ВЫСОТЫ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ СУДОВОГО НАВИГАЦИОННОГО РАДАРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	141
Круглова Е.Е., Мысленков С.А. ОСОБЕННОСТИ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ В МОРЯХ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ С 1979 ПО 2022 ГОД	142

Кубряков А.А., Алескерова А.А., Лишаев П.Н., Медведева А.В., Пузина О.С., Мизюк А.И., Станичный С.В. СУБМЕЗОМАСШТАБНАЯ ДИНАМИКА ЧЕРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ И РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	144
Кукушкин В.М., Маркина М.Ю., Гулев С.К. ПОВЕРХНОСТНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС МИРОВОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ И МОДЕЛЕЙ	146
Куликова Ж.М., Демидов А.Н., Добролюбов С.А. СТРУКТУРА ВОД В РАЗЛОМЕ ПУЩАРОВСКОГО ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2023 ГОДА	148
Куприянова А.Е., Гриценко В.А. ХАОТИЗАЦИЯ ПОЛЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ	150
Кускова Е.Г., Осадчиев А.А., Иванов В.В. ВЛИЯНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА И ТАЯНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ОПРЕСНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МОРЕЙ СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА	152
Латонин М.М., Демченко А.Ю. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЗАИМОСВЯЗИ НИСХОДЯЩЕЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ	154
Лебков М.В. ГЕНЕРАЦИЯ ЦУНАМИ ПОДВОДНЫМИ ОПОЛЗНЯМИ И СИЛА ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ	156
Левонян К.А., Багатинский В.А., Дианский Н.А. ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ	158
Лис Н.А., Чернявская Е.А., Тимохов Л.А. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТПО ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ	159
Мальшева А.А., Гневыхов В.Г., Белоненко Т.В. МЕРИДИОНАЛЬНОЕ И ЗОНАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ ВИХРЕЙ ТЕЧЕНИЯ АГУЛЬЯС	161
Марчук Е.А., Чунчuzов И.П., Попов О.Е., Репина И.А., Козлов И.Е., Сильвестрова К.П., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б., Йоханнессен У.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА И ИМПУЛЬСА НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ	162
Медведев И.П., Цуканова Е.С., Крылов А.А. ЦУНАМИ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ: ПОИСК НАИХУДШИХ СЦЕНАРИЕВ НА ОСНОВЕ ДЕТЕРМИНИСТСКОГО ПОДХОДА	164

Медведева А.Ю., Файн И.В., Медведев И.П., Куликов Е.А., Яковенко О.И. ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ ДЛЯ БЕРИНГОВА И ЧУКОТСКОГО МОРЕЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСОКЕАНСКИХ И ЛОКАЛЬНЫХ ЦУНАМИ	166
Меркулов В.А., Махотин М.С., Кузьмин С.Б., Карпов М.В., Богородский П.В., Тимохов Л.А. МНОГОЛЕТНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕ- ЖИМА ПРОЛИВА ШОКАЛЬСКОГО	167
Куссе-Тюз Н.А., Тарасенко А.Д., Меркулов В.А., Карпов М.В., Игнатов Д.А., Павский С.В., Фильчук К.В. ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОГО БАС- СЕЙНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В 2022 – 2023 ГГ.	169
Мехова О.С., Смирнова Д.А., Фрей Д.И., Кречик В.А. ВОДООБМЕН МЕЖДУ КОТЛОВИНАМИ КАБО-ВЕРДЕ И СЬЕРРА-ЛЕОНЕ В ВО- СТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ	171
Молчанов М.С., Антипов Н.Н, Кашин С.В., Кузнецова М.Р. О ВЛИЯНИИ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ ФОР- МИРОВАНИЯ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕ- ДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ААНИИ В ЗАЛИВЕ ПРЮДС)	173
Мысленков С.А. АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ВДОЛЬ ТРАССЫ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ	175
Нарижная А.И., Чернокульский А.В. ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ АРК- ТИЧЕСКИХ МОРЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ CERES И ЭКСПЕРИМЕНТОВ МОДЕЛЕЙ SMIP6	177
Новоселова Е.В., Файман П.А., Дидов А.А., Будянский М.В., Солонец И.С., Бе- лоненко Т.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВА- НИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ	179
Онищенко Н.А., Лоскутов А.В., Медведева А.Ю., Медведев И.П., Архипкин В.С. ЧИЛИЙСКИЕ ЦУНАМИ 1960 И 2010 ГГ. НА ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ	181
А.В. Буренин, И.Е. Осипов ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛ- НОВОДА НА СТАЦИОНАРНОЙ ТРАССЕ В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ	183
Остроумова С.А., Фрей Д.И. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ МАЛЬВИНСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ	185

Панасенкова И.И., Фомин В.В., Дианский Н.А. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	187
Панасик А.В., Собаева Д., Зюляева Ю.А. ТРОПОСФЕРНЫЕ ПРЕДИКТОРЫ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫЕ ФАЗЫ ЭНЮК ПО ДАННЫМ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	189
Пилик Д.И., Медведев И.П., Цуканова Е.С. ЦУНАМИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ	191
Резвов В.Ю., Криницкий М.А., Голиков В.А., Тилинина Н.Д. ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОЙ ВЫСОТЫ ВЕТ- РОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ СУДОВОГО НАВИГАЦИОННОГО РАДАРА ЗА СЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	192
Рогожин В.С., Осадчиев А.А., Коновалова О.П., Калениченко В.О., Кирюшина М.В., Шабалин Н.В. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛЮМА РЕКИ ЛЕНА И ДРУГИХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКИХ РЕК В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД В 2018-2021 ГОДАХ	194
Рогожин В.С., Осадчиев А.А. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙСКОГО ЗАЛИВА	196
Семенов В.А., Романенко В.А. ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА В XXI ВЕКЕ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ CMIP6	198
Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С. ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИ- ВОСТИ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ	200
Савин А.С., Осадчиев А.А. СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛЮМОВ КРУПНЫХ АРКТИЧЕСКИХ РЕК В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА	202
Сандалюк Н.В., Хачатрян Э.М., Lozou P.L. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИХРЕЙ В ПРИКРОМОЧНОЙ ЗОНЕ АРК- ТИКИ НА ОСНОВЕ НЕРОЙННОЙ СЕТИ YOLO	204
Свергун Е.И., Зимин А.В. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТ- РЕННИХ ВОЛН НА ТИХООКЕАНСКОЙ АКВАТОРИИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА И СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2017 - 2021 ГГ.	206

Сидоров Д.Д., Боджона С.Д., Луньков А.А. О ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ВОДОПОДОБНОГО ДНА АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА	208
Силеверстова О.С., Башмачников И.Л. ВЛИЯНИЕ ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЫ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ АТЛАНТИЧЕСКОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ	210
Сильвестрова К.П. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОД В ЗАПОВЕДНИКЕ УТРИШ В 2020-2021 ГГ. ПО ДАННЫМ ЗАЯКОРЕННОЙ ТЕРМОКОСЫ	212
Смирнов М.А. КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ТИХОГО ОКЕАНА	214
Смирнова Д.А., Медведев И.П. ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	216
Собаева Д., Зюляева Ю.А. РАЗЛИЧИЯ ТРОПОСФЕРНО-СТРАТОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ КАНОНИЧЕСКОГО ЭЛЬ-НИНЬО И ЭЛЬ-НИНЬО МОДОКИ В ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ	218
Соколов А.А., Иванов В.В., Смирнов А.В. ВКЛАД ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В БАЛАНС АДВЕКТИВНОГО ТЕПЛА И СОЛИ	219
Соколов Д.Д., Калюжный Д.С., Горячев В.А. ТРИТИЙ В ВОДАХ ЯПОНСКОГО, ОХОТСКОГО МОРЕЙ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА В 2022-23 ГОДАХ	221
Файман П.А., Будянский М.В., Солонец И.С., Дидов А.А., Сапогов И.М., Пранц С.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛАГРАНЖЕВЫЙ АНАЛИЗ ПРИБРЕЖНОГО АПВЕЛЛИНГА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ	223
Сумкина А.А., Кивва К.К. ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ	224
Сухонос П.А., Иванов В.В., Дианский Н.А. ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ	225
Тимофеева А.Б., Май Р.И., Миронов Е.У., Егорова Е.С., Рубченя А.В. ОЦЕНКА ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И ОСНОВНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЕГО ФАКТОРОВ	227
Травкин В.С., Тихонова Н.А., Захарчук Е.А. МОРСКИЕ ВОЛНЫ ТЕПЛА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ	229

Трегубов А.С., Диденкулова Е.Г., Кокорина А.В., Слюняев А.В. СПЕКТРАЛЬНЫЙ И ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВАРИАЦИЙ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ В ОХОТСКОМ МОРЕ	231
Удалов А.А., Будянский М.В., Пранц С.В., Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю. ЭВОЛЮЦИЯ И СТРУКТУРА МЕЗОМАСШТАБНОГО АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ: НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ	233
Филипсон В.А., Гордеева С.М., ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ В ЧУКОТСКОМ МОРЕ	235
Фокина К.В. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЛН НА КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЕ	237
Фомин В.В., Панасенкова И.И. ВЛИЯНИЕ УСВОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВИХРЕВОЙ ДИНАМИКИ ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ В МОДЕЛИ МОРСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ	239
Фомин В.В., Коршенко Е.А., Панасенкова И.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ЕГО УРОВНЯ И СТОКА РЕК	240
Фомин В.В., Панасенкова И.И., Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Землянов И.В. АНАЛИЗ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ П-ОВА КАМЧАТКА	242
Харина А.И., Воронкова М.С., Хаймина О.В. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ КЛИМАТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА БАЛТИЙСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ	244
Худякова С.П., Удалов А.А., Будянский М.В., Белоненко Т.В. АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РАЙОНЕ АЛЕУТСКОЙ ГРЯДЫ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ	246
Цедрик С.В., Май Р.И. ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ В XX-XXI ВЕКАХ ПО НАТУРНЫМ И МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ	248
Цуканова Е.С., Медведев И.П., Владимирова И.С., Медведева А.Ю. ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ 1 ЯНВАРЯ 2024 ГОДА	249
Шаратунова М.В., Юлин А.В., Иванов В.В. ТИПЫ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ПЕРИОД КРУГЛОГОДИЧНОЙ НАВИГАЦИИ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ	250

Ширыборова А.И., Медведев И.П., Архипкин В.С. ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛЕНИЯ НА ПРИЛИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАЛИФОРНИЙСКОГО ЗАЛИВА	252
Шишкова П.О., Медведев И.П. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛ- ТИЙСКОГО МОРЯ	254
СЕКЦИЯ «БИОЛОГИЯ ОКЕАНА»	256
Александрова П.Н., Майорова М.А., Хайтов В.М., Стрелков П.П., Сказина М.А. ТРАНСМИССИВНАЯ НЕОПЛАЗИЯ МИДИЙ <i>MYTILUS TROSSULUS</i> В ТАУЙСКОЙ ГУБЕ ОХОТСКОГО МОРЯ: ДИАГНОСТИКА И РАЗНООБРАЗИЕ	256
Алескеров Н.Р.о., Пуцин И.И. АДАПТАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, В ЧАСТНОСТИ, ТОПОГРАФИИ ГАНГЛИ- ОЗНЫХ КЛЕТОК И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЕТЧАТКИ К ОСО- БЕННОСТЯМ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ У ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА АРОГОНИДАЕ: <i>RHABDAMIA GRACILIS</i> , <i>TAENIAMIA FUCATA</i> , <i>OSTORHINCHUS CYANOSOMA</i> , <i>SPHAERAMIA</i> <i>НЕМАТОПТЕРА</i>	258
Лескова С.Е., Барсова Е.А., Михеев Е.В., Ковалев Н.Н. ИНДОЛ УКСУСНАЯ КИСЛОТА – МОДУЛЯТОР РОСТА НЕКОТОРЫХ ЗЕЛЕННЫХ И ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ	260
Баяндина Ю.С., Кулешова О.Н. АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ БЕЛКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ОПСИНОВ <i>PLEUROBRANCHIUM</i> ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ УЧАСТИЯ В ПРОЦЕССАХ ФОТОРЕЦЕПЦИИ	262
Белоусова Ю. В. ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЦЕРКАРИЙ ТРЕМАТОД СЕМЕЙСТВА ОРЕСОЕЛИДАЕ У БРЮХОНОГИХ МОЛЛЮСКОВ <i>HYDROBIA ACUTA</i> В ЧЕРНОМ МОРЕ	264
Богачева Е.А., Кладченко Е.С., Кухарева Т.А., Андреева А.Ю., Челебиева Э.С. ОЦЕНКА РЕАКЦИИ КЛЕТОЧНОГО ИММУНИТЕТА ГЕМОЦИТОВ СРЕДИЗЕМНО- МОРСКОЙ МИДИИ <i>MYTILUS GALLOPROVINCIALIS</i> НА ИНВАЗИЮ ЗЕЛЕННОЙ МИК- РОВОДОРОСЛИ <i>СОССОМУХА PARASITICA</i> (В УСЛОВИЯХ <i>IN VITRO</i>)	265
Богданович Ю.В., Шалагина Н.Е., Кохан А.С. АКТИВНОСТЬ СУКЦИНАТДЕГИДРОГЕНАЗЫ И СОСТОЯНИЕ АДЕНИЛАТНОЙ СИ- СТЕМЫ ТКАНЕЙ <i>ANADARA KAGOSHIMENSIS</i> (ТОКУНАГА, 1906) В УСЛОВИЯХ ОСТРОЙ ГИПОКСИИ И СЕРОВОДОРОДНОЙ НАГРУЗКИ	267
Ботнев Д.А. ИСТОРИЯ ПРОМЫСЛА МОРСКИХ ГРЕБЕШКОВ У СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТ- РОВОВ	269
Буряк И.А., Гринченко А.В., Сокольников Ю.Н., Кумейко В.В. ВЫДЕЛЕНИЕ И СВОЙСТВА НОВОГО УГЛЕВОД-СВЯЗЫВАЮЩЕГО БЕЛКА ИЗ ГЕ- МОЛИМФЫ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА СЕМЕЙСТВА АРСИДАЕ	271

Василенко Л.Н. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОРИК ИНФУЗОРИЙ-ТИНТИНИД В ОСАДКАХ КЕРНОВ LV83-29-1 И LV83-32-1 ИЗ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ	273
Власова Е. В., Сабиров Р. М., Голиков А. В., СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПОЛОВОЙ СИСТЕМЫ ЗОЛОТОЙ КАРАКАТИЦЫ <i>ACANTHOSEPION ESCULENTUM</i> (CERHALOPODA, SEPIIDA)	275
Войтовская А.И., Орлова Т.Ю. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ДИНОФЛАГЕЛЛЯТ У БЕРЕГОВ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА В АВГУСТЕ-СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА	277
Волкова А.Л., Рутенко О.А., Даутова Т.Н. ВИДОВОЙ СОСТАВ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОФИУР, СОБРАННЫХ В ЭКСПЕДИЦИИ ТИХООКЕАНСКОГО ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА 2023 НА ЮГО-ВОСТОЧНОМ И ЮГО-ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАМЧАТКИ	279
Домрачева М.М., Хабибулина В.Р. ЧТО ОНИ ЧУВСТВУЮТ? ОРГАНИЗАЦИЯ СЕНСОРНЫХ РЕГИОНОВ В РОПАЛИЯХ <i>CYANEA TZETLINII</i> KOLBASOVA et. NERETINA, 2015 (CNIDARIA: SCYPHOZOA)	281
Дорофеев Е.Д., Шарова А.И. НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ПО БИОЛОГИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЮ НИЖНЕАМУРСКОГО ХАРИУСА <i>THYMALLUS TUGARINAE</i> , SALMONIDAE: THYMALLINAE РЕК БОЛЬШАЯ УССУРКА И БОЛЬШАЯ СЕВЕРНАЯ (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ) В 2022-2023 ГГ.	283
Другова Е.С., Фоменко С.Е., Кушнерова Н.Ф. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИПИДНОГО СОСТАВА НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ МОРСКИХ ВОДОРОСЛЕЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ	285
Зверева А.Ю., Орлова Т.Ю., Морозова Т.В. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОКОЯЩИХСЯ СТАДИЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ПРИБРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА	287
Зенина А.И., Власова Е.В. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЙОБЕНТОСНЫХ ОРГАНИЗМОВ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ НА ПРИМЕРЕ СОЛОНОВОДНОГО АКВАРИУМА	289
Зими́на В.Р. СРАВНЕНИЕ ТЕМПОВ РОСТА КАЛЬМАРОВ <i>BERRYTEUTHIS MAGISTER</i> BERRY, 1913 И <i>BERRYTEUTHIS SEPTEMDENTATUS</i> SASAKI, 1915 (GONATIDAE: COLEOIDEA).	291
Зинов А.А., Орлова Т.Ю. МЕТОДИКА СБОРА И ПОДГОТОВКА ПРОБ ФИТОПЛАНКТОНА ДЛЯ КРИОКОНСЕРВАЦИИ В ЦКП РК «МОРСКОЙ БИОБАНК»	293
Иванова Д.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Радченко И.Г. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИТОПЛАНКТОНА ДВУХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ, НАХОДЯЩИХСЯ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ	295

Иванова Н.Ю.	ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРФО-АНАТОМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИИ АРКТИЧЕСКОЙ АКТИНИИ <i>HALCAMPRA ARCTICA</i> CARLGREN, 1893 (HALCAMPIDAE, АСТИНИАРИА, ANTHOZOA, CNIDARIA)	297
Карманов В.А., Сергеева В.М., Дриц А.В., Кравчишина М.Д.	ВКЛАД ПЛАНКТОННОЙ БИОТЫ В ГОДОВОЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОТОК ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ	299
Киселев А.Д., Залота А.К.	ТРОФИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ В СООБЩЕСТВЕ ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ КАРСКОГО МОРЯ ПОСЛЕ ВСЕЛЕНИЯ КРАБА-СТРИГУНА <i>CHIONOECETES OPILIO</i>	301
Колобухова М.Д., Курносов Д.С.	ДАННЫЕ О ВСТРЕЧАЕМОСТИ И БИОЛОГИИ ЗАПРОРЫ <i>ZAPRORA SILENUS</i> В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА И ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ	303
Курносов Д.С., Ерулина А.О.	РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИЙ СЕЛЬДЕВОЙ АКУЛЫ <i>LAMNA DITROPIS</i> В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА	305
Лаврентьева А.В.	ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ФАУНЕ КУМОВЫХ РАКОВ (CRUSTACEA: CUMACEA) ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ВЫХОДОВ И ХОЛОДНЫХ ВЫСАЧИВАНИЙ В БЕРИНГОВОМ МОРЕ (ПО ДАННЫМ 82 РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК М.А. ЛАВРЕНТЬЕВ»)	307
Лавриченко Д.С., Челебиева Э.С., Кладченко Е.С.	ПРОДУКЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ В ГЕМОЦИТАХ МОРСКОГО ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА <i>ANADARA KAGOSHIMENSIS</i> В УСЛОВИЯХ ГИПООСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА	309
Лифанчук А.В., Микаэлян А.С., Мошаров С.А., Очередник О.А., Силкин В.А., Федоров А.В.	ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ	311
Ляшко Т.В., Муханов В.С., Губанова А.Д.	ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОТОКА УГЛЕРОДА В ЧЁРНОМ МОРЕ, СВЯЗАННОГО С ДЫХАНИЕМ МИГРИРУЮЩИХ КОПЕПОД <i>CALANUS EUXINUS</i> И <i>PSEUDOCALANUS ELONGATUS</i>	313
Манойлина П.А., Комендантов А.Ю., Шапошникова Т.Г., Халаман В.В.	ВНУТРИВИДОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНКУРЕНЦИЯ У <i>HALICHONDRIA PANICEA</i> PALLAS, 1766 (PORIFERA: DEMOSPONGIAE)	315
Меркин В.А.	СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ КРАБОВ РОДА <i>TRAPEZIA</i> НА РАННИХ СТАДИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВА КОРАЛЛОВОГО РИФА	317

- Метревели В.Е., Галышева Ю.А.**
 ДАННЫЕ ПО СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ НЕКОТОРЫХ СООБЩЕСТВ МАКРОБЕНТОСА В БУХТЕ КИЕВКА В АВГУСТЕ 2023 Г. 319
- Мишустина Е.П., Трофимова А.Б.**
 ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА СООБЩЕСТВА МИКРООРГАНИЗМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ КАРСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ МЕТОДАМИ МЕТАГЕНОМИКИ 321
- Мокрина М.С., Нагасава К., Канамори М., Натсуйке М., Осада М..**
 ИЗМЕНЕНИЕ РЕПРОДУКТИВНОГО СТАТУСА ПРИМОРСКОГО ГРЕБЕШКА *MIZUNOPRESTES YESSOENSIS* НА ФОНЕ ПОВЫШЕННОЙ СМЕРТНОСТИ МОЛОДИ В ЗАЛИВЕ ФУНКА ТИХОГО ОКЕАНА 323
- Нерезенко А.М., Тупицына С.А., Рыжик И.В., Малавенда С.В.**
 ЭПИФИТЫ *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (PHAEOPHYCEAE) В ГУБЕ ТЕРИБЕРСКАЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ 325
- Осипова Д.Д., Кособокова К.Н.**
 ВИДОВОЙ СОСТАВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕЛАГИЧЕСКИХ АМФИПОД АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА 327
- Петроченко Р.А., Лищенко Ф.В., Бурмистрова Ю.А., Бритаев Т.А.**
 ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ОБИЛИЕ СИМБИОНТОВ КОРАЛЛА *POCILLOPORA VERRUCOSA* 329
- Прозоров А.А.**
 ПАРАЗИТОФАУНА И МИКРОФЛОРА КОМАНДОРСКОГО КАЛЬМАРА *BERRYTEUTHIS MAGISTER* (BERRY, 1913) 331
- Ростовцева М.О.**
 РАЗВИТИЕ ЛИЧИНОК *PHOLIS CRASSISPINA* (PERCIFORMES) В ВОДАХ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОГО МОРЯ 333
- Салова И.А., Хабибулина В.Р., Домрачева М.М.**
 ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПРОПАГУЛ *LINUCHE* SP. (SCYRHOZOA, CORONATAE) 335
- Самойлова Д.П.**
 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И БИОМАССЫ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА В ТИХООКЕАНСКИХ ВОДАХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД 2019–2022 ГГ. 337
- Сапова О.А., Коновалова О.П.**
 ОБИЛИЕ И ВИДОВОЙ СОСТАВ ЛЕДОВЫХ И ПЛАНКТОННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ РЕЙСА НИС «ДАЛЬНИЕ ЗЕЛЕНЦЫ» (ИЮЛЬ 2023 Г.) 339
- Сошнина В.А., Пильганчук О.А., Зеленина Д.А.**
 ВНУТРИВИДОВАЯ СТРУКТУРА КИЖУЧА (*ONCORHYNCHUS KISUTCH* WALBAUM) НА АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ АРЕАЛА 341

Таганова М.М. ОРНИТОФАУНА КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОПУТНЫХ СУДОВЫХ УЧЕТОВ В 2022-2023 ГГ.	343
Танкович А.Е. ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРОТОНИНЕРГИЧЕСКОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ У ПОЗДНИХ ЛИЧИНОК МОРСКИХ ЕЖЕЙ <i>MESOCENTROTUS NUDUS</i>	345
Тевс К.О., Шевченко О.Г. ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ОСТРОВА РУССКИЙ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ).	346
Ткачук А.А., Кухарева Т.А., Кладченко Е.С., Андреева А.Ю. ВЛИЯНИЕ КАТЕХОЛАМИНОВ НА ФАГОЦИТОЗ ГЕМОЦИТОВ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОЙ МИДИИ (<i>MYTILUS GALLOPROVINCIALIS</i>)	348
Трофимова А.В., Авдеева Е.В. МИКРОФЛОРА КОРЮШКИ <i>OSMERUS EPERLANUS</i> (LINNAEUS, 1758) ЗА ДЛИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ	350
Трубицин В.Ю. ПЕРВОЕ В РОССИИ РАЗВЕДЕНИЕ <i>GNATHANODON SPECIOSUS</i>	352
Тумас А.В., Сокольников Ю.Н. ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТАРНОЙ ИНВАЗИИ, ВЫЗВАННОЙ <i>COCCOMYXA PARASITICA</i> , НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ <i>MODIOLUS KURILENSIS</i> ЯПОНСКОГО МОРЯ	354
Усатов И.А., Бурканов В.Н. ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ СИВУЧА <i>EUMETOPIAS JUBATUS</i> SCHREBER, 1776	356
Уфимцева М.А., Сахонь Е.Г., Муханов В.С. ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИРИО-, БАКТЕРИОПЛАНКТОНА И ЦИАНОБАКТЕРИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЁРНОГО МОРЯ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕЙ ГОМОТЕРМИИ	358
Халаимова А.В., Дмитриева Е.В., Во Тхи Ха ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ЭКТОПАРАЗИТОВ СКАТОВ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ У ПОБЕРЕЖЬЯ ВЬЕТНАМА	360
Хмель Д.С., Василенко Л.Н. ВИДОВОЙ СОСТАВ СЕМЕЙСТВА CARROCIIDAE В ОТЛОЖЕНИЯХ ЮЖНЫХ ГАЙОТОВ ИМПЕРАТОРСКОГО ХРЕБТА	362
Хорошутина О.А., Артеменков Д.В., Сологуб Д.О. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА МОЛЛЮСКОВ РОДА <i>BUCCINUM</i> НА ПРИМЕРЕ <i>B. ESTOMOSUM</i> DALL, 1907 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ПОДСЧЕТА ОТМЕТОК РОСТА НА СТАТОЛИТАХ	364
Цой Е.А., Сокольников Ю.Н., Гринченко А.В. АГГЛЮТИНИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕМОЛИМФЫ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ИЗ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ	366

Шульгина М.А., Качур Д.И. НОВЫЙ ДЛЯ МОРЕЙ РОССИИ ВИД ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ	368
Щербакова В.Д., Барминцева А.Е., Мюге Н.С., Сафронов А.С. РОССИЙСКИЕ ОСЕТРЫ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ	370
Щербакова Е.А., Есипова П.В., Ячмень В.А., СРАВНИТЕЛЬНАЯ МОРФОЛОГИЯ КЛЕТОК КРОВИ АФАЛИНЫ (<i>_TURSIOPS TRUNCATUS_</i>) И ТИХООКЕАНСКОГО БЕЛОБОКОГО ДЕЛЬФИНА (<i>_SAGMATIAS OBLIQUIDENS_</i>)	372
Юрикова Д.А., Кособокова К.Н. СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПОЛОВОЙ СИСТЕМЫ САМОК <i>METRIDIA LONGA</i> LÜBBOCK, 1854 В БЕЛОМ МОРЕ	374
Юрикова Е.А., Орлова Т.Ю. ЛЕДОВЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ В 2021 Г.	376
Ягодина В.Д., Брыков Вл.А. ГЕНОТИПИРОВАНИЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ТРЕПАНГА <i>APOSTICHOPUS JAPONICUS</i> <i>IN VIVO</i> : НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ВИДА	378
СЕКЦИЯ «МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА»	379
Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б. ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАН- НЫМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕРЕГОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА	379
Баженов И.И., Василенко Ю.П., Горбаренко С.А. РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ (НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛА ЛЕДОВОГО РАЗНОСА)	381
Веклич И.А. ПРИРОДА ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНО-ИНДИЙСКОГО ХРЕБТА	383
Гуров К.И., Фомин В.В. ОЦЕНКА ВКЛАДА ВОЛНОВОЙ АСИММЕТРИИ В ДИНАМИКУ ФРАКЦИЙ НАНО- СОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ КАЛАМИТСКОГО ЗАЛИВА	385
Гуров К.И., Кременчуцкий Д.А., Журавлева А.А. ПОТОКИ ВЕЩЕСТВ И СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА СЕВЕРНОМ ШЕЛЬ- ФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ	387
Еськова А.И. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕ- НИЯХ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ	389
Крылов А.А., Логвина Е.А., Зыков Е.А. ИКАИТ В ОСАДКАХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ	391

Ким Д.В., Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С., Иванов М.В., Алаторцев А.В. ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РТУТИ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 200 ЛЕТ	393
Кислов М. В. ПЛАТФОРМА IASRAAS КАК ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ.	395
Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Кравчишина М.Д., Дара О.М., Филиппов А.С., Новичкова Е.А., Сломнюк С.В., Лозинская Л.А. НАХОДКА ВИВИАНИТА В ДОННЫХ ОСАДКАХ КАРСКОГО МОРЯ	397
Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т., Колесник А.Н., Терехов Е.П. ТИПИЧНОЕ И НЕТИПИЧНОЕ ЖЕЛЕЗОМАНГАНЦЕВОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ЯПОНСКОМ МОРЕ	399
Костромина Н.А., Яржембовский Я.Д., Гусев Е.А., Усов А.Н. РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ КОЛОНКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОХОТСКОГО МОРЯ	401
Крылов А.А., Либина Н.В., Ковачев С.А. МОДЕЛЬ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ЛАПТЕВО-МОРСКОГО РЕГИОНА	403
Кузьмина В.А., Артемова А.В., Лю Я. ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПОСЛЕДНИХ 23 ТЫСЯЧ ЛЕТ НА ОСНОВЕ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА	405
Кулешова Л.А., Баширова Л.Д., Дорохова Е.В. КОРРЕЛЯЦИЯ ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В СУАРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА И НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОМ БАСЕЙНЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 11 ТЫСЯЧ ЛЕТ	407
Лысенко Е.И. РЕКОНСТРУКЦИИ ГОЛОЦЕНОВОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПРИВЕРШИННОЙ ЧАСТИ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА	409
Люткевич А.Д., Добрецова И.Г., Кулаженок М.Н., Яговкина М.А. КРАТКИЕ ИТОГИ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПЮИ ДЕ ФОЛЬ (САХ) В 2022-23 ГОДАХ	411
Малицкий С.И., Яцук А.В., Аксентов К.И., Швалов Д.А. ЛИТОЛОГО-ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА	413
Мамонтов А.Е., Репина И.А. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН ЗА 2021-2023 ГОДА	415
Меренкова С.И., Михеев И.В., Калмыков Г.А., Габдуллин Р.Р., Широян М.М. ПРИМЕНЕНИЕ ЩЕЛОЧНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КРЕМНЕЗЕМА ДЛЯ ПОРОД КАЙНОЗОЯ И РАННЕГО ПАЛЕОЗОЯ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	417

Мигдисова И.А., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Булохов А.В. ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСАЖДАЮЩЕМСЯ ВЕЩЕСТВЕ В СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОГО БАССЕЙНА . . .	419
Немченко Н.В., Дорохова Е.В., Уголькова Е.А., Соловьева М.А., ЛИТОЛОГИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ КОНТУРИТОВЫХ ДРИФТОВ АКАДЕМИЧЕСКОГО ХРЕБТА ОЗЕРА БАЙКАЛ	422
Новиков М.А., Крылов А.А. ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ	424
Прушковская И.А., Обрезкова М.С., Гусев Е.А. КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ .	426
Рубан А.С., Дударев О.В. ВЛИЯНИЕ РАЗГРУЗКИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ФЛЮИДОВ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОСАДКОВ	428
Селютин С.А. РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КЕРНОВ МОРСКИХ ОСАДКОВ (НА ПРИМЕРЕ МАТЕРИАЛА ИЗ ЮЗ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ)	430
Семиколенных Д.В., Панин А.В. ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В МАНЫЧСКОЙ ДЕПРЕССИИ В КОНЦЕ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА	432
Сергеева В.М., Лейченков Г.Л. СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ ЗЕМЛИ МЭРИ БЭРД, ЗАПАДНАЯ АНТАРКТИКА	434
Смирнов Ю.Ю., Матвеева Т.В., Щур А.А., Чазов А.О. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ФИЛЬТРОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ БЕРИНГОВА МОРЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ-РОБОТА ДЛЯ CSMHUD HYDOFF	436
Смирнова К.М., Новичкова Е.А., Козина Н.В., Сломнюк С.В., Матуль А.Г., Кравчишина М.Д. ЭТАПЫ ПОСТУПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД НА ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ШЕЛЬФ КАРСКОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР	438
Соловьева М.А., Монтелли А.И., Рыбалко А.Е., Репкина Т.Ю., Аксёнов А.О., Щербакова Е.В., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е., Колюбакин А.А., Токарев М.Ю., Ахманов Г.Г. ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ	440

Чазов А.О., Матвеева Т.В. РЕДКИЕ ГАЗОГИДРАТОНОСНЫЕ СТРУКТУРЫ ТИПА "ПАГОДА" В БЕРИНГОВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ МОВ ОГТ	442
Шабельникова С.К., Василенко Ю.П. УСЛОВИЯ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ ЮЖНОГО ЕВРАЗИЙСКОГО СКЛОНА ПОДВОДНОГО ХРЕБТА ЛОМОНОСОВА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ	444
Яковенко Е.С., Черкашѐв Г.А. СВЯЗЬ СОСТАВА СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ХАРАКТЕРОМ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД: НА ПРИМЕРЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ИРИНОВСКОЕ 1 И 2 (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ)	446
СЕКЦИЯ «ХИМИЯ И БИОГЕОХИМИЯ ОКЕАНА»	448
Алексеева Н.К., Никулина А.Л., Блошкина Е.В., Рыжов И.В., Новихин А.Е., Махотин М.С. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАЛИВОВ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА	448
Анисимова Е.В., Духова Л.А., Лавинен Н.А., Тарасенко А.Д., РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНДИЙСКОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА В ЛЕТНИЙ И ОСЕННИЙ СЕЗОН 2021-2022 ГГ.	450
Балашова К.А., Ефимова К.А., Бубнова Е.С. СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И ГРАНИЦЫ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ГДАНЬСКОЙ ВПАДИНЕ В 2022 - 2023 ГГ.	452
Борисенко Г.В., Полухин А.А., Шука А.С., Колтовская Е.В. ВЛИЯНИЕ ОБСКО-ЕНИСЕЙСКОГО СТОКА НА ГИДРОХИМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ (НОВАЯ ЗЕМЛЯ) В 2022 И 2023 Г.	454
Варварова А.О., Полухин А.А., Бердникова Е.К., Мухаметов С.С., Борисенко Г.В., Пронина Ю.О., Ребецкая Е.А., Бородулина П.А. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ВОД НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «ГЕЛЕНДЖИК» В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД	456
Гурова Ю.С., Гуров К.И., Орехова Н.А. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА И ФЕОДОСИЙСКОГО ЗАЛИВА	458
Еремейко Т.Н. ПРОДУКЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МОРЕЙ СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2018-2021 ГГ.	460
Зайцева П.Д., Еремина Т.Р., Курносова А.С. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГИПОКСИИ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)	462

Казакова У.А., Полухин А.А., Шука А.С. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД КАРСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ	464
Киль А.О., Семенов П.Б., Письменюк А.А., Шатрова Е.В., Малышев С.В. ГЕНЕРАЦИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ (МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА) ПРИ ОТТАИВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ	466
Коссова С.А., Дубинина Е.О., Чиждова Ю.Н., Авдеенко А.С. ИСТОЧНИКИ ОПРЕСНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЕВРАЗИЙСКОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПО ИЗОТОПНЫМ (δD , $\delta^{18}O$) ДАННЫМ.	468
Кременчуцкий Д.А., Гуров К.И., Гурова Ю.С., Бежин Н.А. СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ БЕРИЛЛИЯ-7 В ЧЕРНОМ МОРЕ	470
Кременчуцкий Д.А., Батраков Г.Ф. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРИЯ-234 НА СЕВЕРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ	472
Кузьмина С.К., Лобанова П.В. ОЦЕНКА РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ	473
Курносова А.С. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ ИМПЕРАТОРСКОГО ХРЕБТА В 2019 ГОДУ, ТИХИЙ ОКЕАН	475
Леусов А.Э., Чаркин А.Н., Красиков В.А. ОСОБЕННОСТИ РАЗГРУЗКИ СУБМАРИННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД В ЧАУНСКОЙ ГУБЕ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)	477
Малахова Т.В., Будников А.А., Краснова Е.А., Иванова И.Н., Хурчак А.И. СЕЗОННЫЕ И СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЧЕРНОМОРСКИХ МЕЛКОВОДНЫХ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ И ИХ СРЕДООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ НА ПРИМЕРЕ СИПОВ В БУХТЕ ЛАСПИ	479
Малыгин Е.Ю., Курносова А.С. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА	481
Мукосеев И.Н., Медведев Е.В., Орехова Н.А., Гуров К.И. ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДАХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД	483
Муратова А.А., Полухин А.А., Пронина Ю.О. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ	485
Муратова А.А., Полухин А.А., Пронина Ю.О. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА	487

Мурзакова Ю.В., Костылева А.В., Полухин А.А. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ОБСКОГО ЭСТУАРИЯ	489
Александров С.В., Найданов Д.А. ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВОД И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В КУРШСКОМ И ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВАХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2023 Г.	491
Перцовская В.К., Иванов Б.В. ОСОБЕННОСТИ ШИРОТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ИНДИЙСКОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА В ДЕКАБРЕ 2022 – ФЕВРАЛЕ 2023 ГГ.	493
Пронина Ю.О., Полухин А.А., Муравья В.О. СТРУКТУРА ВОД И ПОТОК УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА У ГРАНИЦЫ СЕЗОННОГО ЛЬДА В КАРСКОМ МОРЕ	495
Селиверстова А.М., Зуев О.А., Чульцова А.Л. ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПРИДОННЫХ ВОД В КАНАЛЕ ВИМА	497
Соколова Е.Н., Лобанова П.В., Семкин П.Ю. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ рСО ₂ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ	499
Федоров М.С., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Барабанщиков Ю.А. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАБИЛЬСКОГО ЗАЛИВА (О. САХАЛИН, ОХОТСКОЕ МОРЕ) В ЛЕТНИЙ СЕЗОН 2022 Г.	501
Швед В.А., Егоров А.В., Кравчишина М.Д., Кудрявцева Е.А., Новигатский А.Н., Саввичев А.С. КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 89-ГО РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»	503
СЕКЦИЯ «ЭКОЛОГИЯ МОРЯ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ»	505
Абдрахманова О.Т., Журавель Е.В., Донец М.М. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ УССУРИЙСКОГО ЗАЛИВА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЪЕМКИ 2018 ГОДА	505
Анциферова М.А., Беспалова Л.А., Клещенков А.В. СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ПРЕСНОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ЮГА РОССИИ	507
Борисов М.А., Криницкий М.А. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО КОНТРАСТНОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗВРАТНОЙ МИГРАЦИИ НЕРКИ В УСТЬЕ РЕКИ ФРЕЙЗЕР	509
Боцун Л.А., Московко В.Е., Масленников С.И. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ КУЛЬТУРЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ <i>TETRASELM SP.</i> НА ЧИСЛЕННОСТЬ КОЛОВРАТКИ СОЛОНОВАТОВОДНОЙ <i>BRACHIONUS PPLICATILIS</i> (Müller, 1786).	511

Будько Д.Ф. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МОЛЛЮСКАХ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЕМОВ БЕЛОГО МОРЯ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	513
Голубева Е.А., Ершова А.А., Анисимова Е.В. ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ АНТАРКТИДЫ В 2022 Г.	515
Гринченко А.В., Сокольникова Ю.Н., Тумас А.В., Цой Е.А., Буряк И.А., Мокрина М.С., Кумейко В.В. ИММУННЫЙ СТАТУС ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ МОЛЛЮСКОВ ИЗ АКВАТОРИЙ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО С РАЗЛИЧНЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ	517
Гуров К.И., Котельянец Е.А., Гурова Ю.С. ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ТЕХНОГЕННЫХ НАГРУЗОК В БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЕ ЗА ПЕРИОД 2005–2019 ГГ.	519
Дервянко Е.Г., Густоев Д.В. КОМПЛЕКС МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГНОЗА МАРШРУТА ЛЕДОВОЙ ТРАССЫ С ГОДОВОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ	521
Донская А.Е., Огородников Д.М. СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАЛЫХ ВОД АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В АКВАТОРИИ О. РУССКИЙ.	523
Егорова Е.Л., Стеблина Т.И. ПЛАСТИКОВЫЕ ПЛОТЫ В ОКЕАНЕ И ИХ ОБИТАТЕЛИ	525
Кальпа В.А., Багаев А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ	527
Кладченко Е.С., Ткачук А.А., Гостюхина О.Л., Челебиева Э.С., Андреева А.Ю. ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СНИЖЕНИЯ PH МОРСКОЙ ВОДЫ НА ПРООКСИДАНТНО-АНТИОКСИДАНТНУЮ СИСТЕМУ ТИХООКЕАНСКИХ УСТРИЦ	529
Клименко С.К. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАСЕЙНА ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЗА 2020–2023 ГГ.	531
Лазарева А.М., Ипатова В.И. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИДА SCENEDESMUS QUADRICAUDA ДЛЯ БИОТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ НИЗКОМ И УМЕРЕННОМ УРОВНЯХ МИНЕРАЛИЗАЦИИ	533
Лобанова Т.Р., Журавель Е.В. ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ДОННЫХ ОСАДКОВ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВАНИИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МИКРОВОДОРОСЛИ <i>PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM</i> ВОHLIN	535

- Лопатников Е.А., Калинин В.В., Иванов М.В.**
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМАРНОЙ РТУТИ НАД АКВАТОРИЕЙ МОРЕЙ ВОСТОЧНОЙ АЗИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ 537
- Мартыненко Д.О., Климова А.В.**
АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ РАННИХ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ *FUCUS DISTICHUS* (PHAEOPHYCEAE) В ОТВЕТ НА НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ 539
- Муравья В.О. Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Скороход А.И., Новигатский А.Н., Флинт М.В.**
МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА (CH₄) НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД С 2018 ПО 2022 ГОДЫ. 541
- Пичуева А.С., Пелех А.Д., Шестёра А.А.**
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ГРУНТОВ АКВАТОРИЙ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ 543
- Поливанова Т.К., Жданов И.А., Калашникова В.М., Бирицкая С.А., Пахомова С.В., Якушев Е.В.**
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОПЛАСТИКА У ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ В ВОДАХ ТИХОГО ОКЕАНА И ОХОТСКОГО МОРЯ 545
- Попов Г.Е.**
ФАКТОРЫ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИМОРСКОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ 547
- Прощакова В.А., Ершова А.А., Голубева Е.А.**
ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА (ОТ 100 МКМ) В ОХОТСКОМ МОРЕ В 2019 ГОДУ 549
- Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В.**
ДИНАМИКА СООБЩЕСТВ МАКРО- И МЕГАБЕНТОСА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ 551
- Рюмина А.А., Мазур М.А.**
ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО 552
- Сабуцкая М.А.**
ПТЕНЦЫ ПИНГВИНОВ ГУМБОЛЬДТА (*SPHENISCUS HUMBOLDTI*) В ПРИМОРСКОМ ОКЕАНАРИУМЕ: ОТ ВЫЛУПЛЕНИЯ И ДО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ЖИЗНИ В СТАЕ 554
- Сукманова Т.В.**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ) . . . 556
- Ткаченко Ю.С., Тихонова Е.А., Соловьева О.В.**
ОЦЕНКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ВОДЫ УРОЧИЩА БАТИЛИМАН (ЮЖНЫЙ БЕРЕГ КРЫМА) В ПЕРИОДЫ РАЗЛИЧНОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ . 558

Фетисов С.В., Есюкова Е.Е., Лобчук О.И., Чубаренко И.П. ОЦЕНКА МАССЫ АНТРОПОГЕННОГО МОРСКОГО МУСОРА В ПОСЛЕШТОРМОВЫХ БРОСАХ	560
Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТРИЧНОЙ ФЕРМЫ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ В ЗАЛИВЕ ДОНУЗЛАВ	562
Чекменева Н.А., Погожева М.П., Долгова А.О. СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА О.ВРАНГЕЛЯ	564
Шестёра А.А., Пелех А.Д., Пичуева А.С. ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ГРУНТОВ РЕК ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПРИМОРЬЯ И КАМЧАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ <i>SCENEDESMUS QUADRICAUDA</i>	566
СЕКЦИЯ «ФИЗИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКЕАНА»	568
Аглова Е.А. РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПЕРИОД ПОЛЯРНОЙ НОЧИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ 2023 Г.	568
Боровкова К.А., Мошаров С.А. АНАЛИЗ ВЕСЕННЕЙ И ОСЕННЕЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА "А" ФИТОПЛАНКТОНА В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ	570
Глуховец Д.И., Шеберстов С.В. ВЛИЯНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ НА АЛЬБЕДО ОКЕАНА	572
Дедерер Н.А., Шевляков Е.А., Островский В.И., Хен Г.В. ЗНАЧИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В ПОЯВЛЕНИИ ЭКСТРАВЫСОКОЧИСЛЕННЫХ ПОКОЛЕНИЙ КАРАГИНСКОЙ ГОРБУШИ	574
Дерягин Д.Н., Глуховец Д.И. СУТОЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА НИСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ В КАРСКОМ МОРЕ	576
Кивва К.К. ФЕНОЛОГИЯ ВЕСЕННЕГО ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В БЕРИНГОВОМ МОРЕ	578
Князев А.С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СМЕРТНОСТИ РЫБ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	580
Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Кольцова Е.С., Коновалов Б.В., Дроздова А.Н., Пелевин В.В., Богатов Н.А., Кириллов А.Г. БИООПТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ 2023 ГОДА	582

Кубрякова Е.А., Бакуева Я.И., Кубряков А.А. ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАС- ПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ ПО ДАН- НЫМ БУЕВ БИО-АРГО	584
Лебедева М.А., Будянский М.В., Белоненко Т.В., Файман П.А. АНАЛИЗ ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОКЕАНОЛОГИЧЕ- СКИХ ПОЛЕЙ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА СКУМБРИИ В 2020-2022 ГОДАХ В ЮЖНО- КУРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И СУДОВЫХ ИЗМЕ- РЕНИЙ	586
Липинская Н.А., Салюк П.А., Будянский М.В., Холмогоров А.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РЕЧНЫХ ВОД СЕВЕРА ЮЖНОЙ АМЕРИКИ ЭКВА- ТОРИАЛЬНЫМ ПРОТИВОТЕЧЕНИЕМ АТЛАНТИКИ И СИСТЕМОЙ МЕЗОМАСШТАБ- НЫХ ВИХРЕЙ	588
Лишаев П.Н., Кубрякова Е.А., Кубряков А.А. МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХ- МЕРНОЙ МОДЕЛИ NEMO+BFM	590
Мальшева А.С., Лобанова П.В. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕН- НЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» МОРСКОГО ФИТОПЛАНКТОНА В МОРЯХ СЕВЕРО-ЕВРО- ПЕЙСКОГО БАССЕЙНА	592
Мищенко А.С. МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЗОНЕ ПРО- МЫСЛА У ПОБЕРЕЖЬЯ МАРОККО В 2016-2021 ГГ	594
Мольков А.А., Капустин И.А., Ермошкин А.В., Лещев Г.В., Доброхотова Д.В., Кольцова Е.С., Коновалов Б.В., Дроздова А.Н., Пелевин В.В., Кириллов А.Г. БИООПТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ	596
Павлова М.А., Глуховец Д.И., Дерягин Д.Н. БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД КАРСКОГО МОРЯ В ОКТЯБРЕ-НОЯБРЕ 2023 Г.	598
Поляничко В.И., Панфилов Д.М. СУТОЧНОЕ ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ САРДИ- НЫ И ЯПОНСКОЙ СКУМБРИИ	600
Попик А.Ю. ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПО ИХ ФЛУ- ОРЕСЦЕНТНЫМ ПАРАМЕТРАМ	602
Юшманова А.В., Шатравин А.В., Анохина Л.Л. ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И БИООПТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА БИОМАС- СУ ЗООПЛАНКТОНА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА	604
СЕКЦИЯ «ОКЕАНОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ»	606

Анисимов И.М. МАСШТАБИРОВАНИЕ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДНА С ПОМОЩЬЮ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	606
Вышкваркова Е.В., Греков А.Н., Маврин А.С. АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В РЯДАХ АКТИВНОСТИ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА БИОМОНИТОРИНГА ВОДНОЙ СРЕДЫ	608
Буренин А.В., Диденко В.В. АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ	610
Зорнина Н.А. РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ТЯЖЕЛОГО КЛАССА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИРОВОГО ОКЕАНА	612
Инь Вэньчжао МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИКИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН	614
Колесник А.Н. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТБОРА ПРОБ МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ЛИЧНЫЙ ОПЫТ	616
Комарова Е.П., Гудимов А.В. ECOLOGGER – ИЗУЧАТЬ ЖИЗНЬ, А НЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЖИЗНИ	618
Костеев Д.А., Ермошкин А.В., Разумов Д.Д., Салин М.Б. ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ СИПОВ	620
Красавин Н.А., Коноплин А.Ю., Василенко Р.П. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРАМИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	622
Кудинов О.Б., Мансурова И.М. РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ФЛЮОРИМЕТРА ФР-1	624
Лахно О.В. РАЗРАБОТКА КОНВЕРТЕРА АРХИВНЫХ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ	626
Лесин А.В., Анисимов И.М. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НОВЕЙШИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ БУКСИРУЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	628
Лю Кэсинь РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ МНОГОЛУЧЕВОГО РАЗРЕЖЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ	630

Муравья В.О., Анисимов И.М., Лесин А.В., Римский-Корсаков Н.А. ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАБЛЮДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДНА АКВАТОРИЙ И ПОДВОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ	631
Пацева П.В., Чернов А.В., Савицкая А.В., Крупина Н.А., Свистунов И.А. СОВРЕМЕННЫЙ НАУЧНО-ЭКСПЕДИЦИОННЫЙ ФЛОТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ	633
Рогальский Л.Ю., Будников А.А., Малахова Т.В. КОМПАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАПИСИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ПУЗЫРЬКОВОГО ГАЗА: ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ	635
Юрманов А.П., Коноплин А.Ю., Панчук М.О. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ АНПА	636

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ВЕРХНЕГО ПЕРЕМЕШАННОГО СЛОЯ В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В БЕЗЛЁДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Адамовская П.О.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{2,3}, Мысленков С.А.^{2,4}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: верхний перемешанный слой океана, верхний квазиоднородный слой, ветровое воздействие, волновое воздействие, Карское море, Северный Ледовитый океан.

Арктический регион особенно подвержен происходящим в настоящее время изменением климата. Повышение температуры воздуха в Арктике в последние десятилетия по некоторым оценкам происходило в два раза быстрее относительно других регионов [1]. Наблюдаемое изменение температурных условий и теплового баланса в регионе потенциально может иметь прямое влияние на толщину верхнего перемешанного слоя моря.

Целью данной работы является оценка пространственного распределения толщины перемешанного слоя в Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях по натурным данным, собранным в 8 океанологических рейсах в 2007-2022 годах. Методика исследования заключается в обработке данных, полученных измерениями гидрологических зондов, и последующего вычисления толщины верхнего перемешанного слоя путём нахождения глубины, где значение температуры отличалось больше, чем на выбранную экспериментальным путём пороговую отметку от значения температуры, измеренного на поверхности. Используемая пороговая отметка температуры составляла 0.45 °С от поверхностного значения температуры, вертикальные значения данных усреднялись каждые 0.5 метра.

В районе жёлоба Святой Анны в Карском море толщина перемешанного слоя заметно увеличивается с запада на восток. На восточном склоне жёлоба толщина перемешанного слоя (в среднем, 35 м), в среднем, больше на 17 метров, чем в центре или на его западном склоне (в среднем, 18 м). Данное отличие иллюстрирует прохождение в том районе баренцевоморской ветви атлантических вод, которая взаимодействует с поверхностным слоем океана и приводит к активному перемешиванию со слоем галоклина и промежуточных вод.

В центральной части Карского моря в районе распространения плюма Оби-Енисея большая часть значений толщины перемешанного слоя находится в диапазоне 10-15 метров и не превышает отметку в 20 метров. В юго-западной части Карского моря, находящейся вне плюма, значения толщины перемешанного слоя колеблются около отметки в 20 метров, иногда достигая 25-30 метров. Влияние вод плюма Оби-Енисея также отчётливо просматривается в проливе Вилькицкого, где, по данным гидрологических станций, в 2020 году воды плюма распространились на всю акваторию пролива – средняя толщина перемешанного слоя в данном регионе не превышала отметки в 17 метров. Наличие плюма формирует резкую стратификацию вод в районе эстуариев Оби и Енисея и к северу от них, что подавляет вертикальное перемешивание вод и приводит к меньшей толщине перемешанного слоя в данном районе.

Наибольшая толщина верхнего перемешанного слоя в Карском море (до 90 м) наблюдается у северно-восточной оконечности Новой Земли. По-видимому, это вызвано интенсивным перемешиванием в результате резкой смены направления Западно-Новоземельского течения в районе мыса Желания с восточного на северный из-за особенностей региональной батиметрии. Данное явление приводит к формированию резкой горизонтальной фронтальной зоны между водами плюма Оби-Енисея, расположенными к югу от Новой Земли и водами, поступающими вдоль западного побережья Новой Земли из Баренцева моря [2]. Стоит отметить, что интенсивное перемешивание поверхностного слоя и формирование очень глубокого верхнего квазиоднородного слоя в данном районе остается практически неизученным.

В сравнении с Карским морем толщина поверхностного слоя в центральной части моря Лаптевых в среднем меньше и отличается относительной равномерностью распределения. Значения толщины перемешанного слоя в данном районе не превышают 30 метров. Данные характеристики распределения толщины перемешанного слоя могут быть связаны с тем, что в отличие от вод плюма Оби-Енисея, воды плюма реки Лены в море Лаптевых простираются на большую площадь.

В Хатангском заливе пространственное распределение толщины поверхностного слоя имеет большую пространственную неоднородность. Незначительно превышая отметку в 5 метров в устье залива, толщина перемешанного слоя в центральной части залива увеличивается до отметки в более 20 метров, что указывает на интенсивное вертикальное перемешивание вод в данном районе, которое вызвано сильными приливами (до 70-80 см/с) [3]. При продвижении к вершине залива, толщина перемешанного слоя уменьшается до 10 метров и далее продолжает плавно снижаться.

Распределение значений толщины поверхностного слоя в Восточно-Сибирском море оценивалось по двум разрезам 2017 года, простирающимся на северо-восток от устьев рек Индигирки и Колымы. Проанализированные данные показывают, что границы вод плюма Индигирки простираются дальше, чем границы вод плюма Колымы. Разрез от устья Индигирки имеет характерное распределение толщины перемешанного слоя с малыми значениями толщины поверхностного слоя в прибрежной зоне и видимой границей в районе границы плюма. В то же время на разрезе от устья Колымы наблюдалось нехарактерное увеличение толщины поверхностного слоя в центральной части разреза, что требует дальнейшего изучения.

Полученные результаты указывают на эффективность использования метода пограничных значений температуры для вычисления значений толщины перемешанного слоя и иллюстрируют, что подобный метод вычисления параметра толщины перемешанного слоя может служить дополнительным инструментом подтверждения физических процессов на основе натуральных гидрофизических данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки, соглашение № 075-15-2022-1233 (13.2251.21.0184).

Список литературы

- 1) Corell, Robert W. Challenges of Climate Change: An Arctic Perspective // *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. – 2006. – № 35. – P. 148–152.
- 2) Kremenetskiy V.V., Nedospasov A.A., Shchuka S.A., Shchuka A.S., Zamyatin I.A., Bondar E.A. On the structure of water exchange between the deep northern and shelf southwestern part of the Kara Sea over the Brusilov Sill // *Oceanology*. – 2021. – № 61. – P. 786–790.
- 3) Osadchiev A., Medvedev I., Shchuka S., Kulikov M., Spivak E., Pisareva M., Semiletov I. Influence of estuarine tidal mixing on structure and spatial scales of large river plumes // *Ocean Science*. – 2020. – №4. – P. 781-798.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СПУТНИКОВЫХ РАДАРНЫХ СНИМКОВ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Недурובה А.А., Айлуру С.И., Григорьев Т.А., Вановский В.В.

Сколковский институт науки и технологий, Москва

Ключевые слова: физика океана, ледовая обстановка, радарные снимки, сплоченность льда, сверточные нейронные сети, U-Net, NeuralODE

В последние десятилетия в Арктике происходит особо быстрое потепление, что уже привело к уменьшению площади морского льда более чем на 30% за последние четыре десятилетия [1], а также к сокращению толщины морского льда [2]. Эти изменения способствовали появлению более быстрых и экономичных морских маршрутов, таких как Северный морской путь [3]. Тем не менее, заторы льда все еще представляют собой серьезную угрозу для безопасности морской навигации. Точные оперативные прогнозы состояния морского льда могут помочь справиться с этой проблемой, позволяя судам адаптировать свои маршруты для избежания районов с высокой концентрацией льда.

Существующие модели физики морского льда, основанные на эластично-вязко-пластической реологии, не всегда могут адекватно воспроизвести наблюдаемые характеристики деформации льда [4], что делает их ненадежными для прогнозирования. Кроме того, численное моделирование взаимодействия океана и льда требует значительных вычислительных ресурсов.

В свою очередь, статистические и основанные на данных подходы машинного обучения более гибки и не требуют значительных вычислительных мощностей. Их популярность растет в различных исследовательских областях. В случае моделирования погоды и морского льда, эти методы не нуждаются в сложной физической модели процессов, происходящих в океане и атмосфере. Обученная нейросетевая модель требует только актуальных наблюдений и относительно небольших вычислительных ресурсов для генерации прогноза.

В нашем исследовании мы сосредоточились на прогнозировании ледовых условий в практически значимом небольшом регионе – Обской Губе, которая представляет интерес из-за сложного процесса ледообразования, обусловленного смешиванием соленой воды Карского моря с пресной водой северных рек. Мы используем радарные снимки Обской Губы миссии Sentinel-1, данные погодных наблюдений с метеостанций в регионе, данные оперативного реанализа проекта GLORYS и современные методы искусственного интеллекта, такие как U-Net [5], NeuralODE [6] и Vid-ODE, для решения этой задачи.

В работе демонстрируются значительные улучшения в прогнозировании ледовых условий благодаря разработанным методам фильтрации радарных артефактов, интерполяции пространственных и временных пропусков серии радарных снимков и применению современных техник машинного обучения. Комбинация разработанных подходов с методами глубокого обучения позволяет повысить точность прогноза линейного бейзлайна на 10% при использовании модели NeuralODE, на 14% процентов при использовании модели Vid-ODE и на 17% при использовании модели UNet. Таким образом, наши модели, не требующие ручной разметки экспертов, значительно превосходят простые бейзлайны, как в численных оценках прогнозирования, так и в визуальном качестве результата, открывая новые перспективы для эффективного и безопасного использования арктических морских маршрутов.

Работа выполнена при поддержке Аналитического центра при Правительстве РФ (договор о субсидии 000000D730321P5Q0002, Грант № 70-2021-00145 от 02.11.2021).

Список литературы

- 1) Квок Р. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018) // *Environmental Research Letters*, 2018. – Т. 13, № 10. – С. 105005. – Изд-во: IOP Publishing.
- 2) Реннер Ангелика Х.Х., Герланд Себастьян, Хаас Кристиан, Сприн Гуннар, Беккерс Джастин Ф., Хансен Эдмонд, Николаус Марсель, Гудвин Харви. Evidence of Arctic sea ice thinning from direct observations // *Geophysical Research Letters*, 2014. – Т. 41, № 14. – С. 5029–5036. – Изд-во: Wiley Online Library.
- 3) Williams Timothy, Коросов Антон, Рампал Пьер, Оласон Эйнар. Presentation and evaluation of the Arctic sea ice forecasting system neXtSIM-F // *The Cryosphere*, 2021. – Т. 15, № 7. – С. 3207–3227. – Изд-во: Copernicus GmbH.
- 4) Буйон Сильвен, Рампал Пьер. Presentation of the dynamical core of neXtSIM, a new sea ice model // *Ocean Modelling*, 2015. – Т. 91. – С. 23–37. – Изд-во: Elsevier.
- 5) Роннебергер Олаф, Фишер Филипп, Брокс Томас. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation [Электронный ресурс] // arXiv, 2015. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1505.04597>. – DOI: 10.48550/ARXIV.1505.04597. – Изд-во: arXiv.
- 6) Чен Рики Т. К., Рубанова Юлия, Беттенкурт Джесси, Дувено Дэвид. Neural ordinary differential equations // *Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'18)*. – Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc., 2018. – С. 6572–6583.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ДАТЧИКА ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЕНИЯ В ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТЕ ЧЕРНОГО МОРЯ В 2023-2024 ГГ.

Алюяров Р.М.¹, Тюренкова А.Е.¹, Морозов В.Е.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «ЭКОСТАНДАРТ «Технические решения», город Санкт-Петербург

²Азово-Черноморский бассейновый филиал Федерального государственного унитарного предприятия «Росморпорт», город Новороссийск

Ключевые слова: Черное море, волнение, датчик гидростатического давления, шторм века, волногашение, Геленджикская бухта

В работе были исследованы полученные значения гидростатического давления столба жидкости, преобразованные в поверхностное волнение в акватории марины Геленджикского порта в период с 2023-2024 гг.

Был проведен сравнительный анализ полученных данных с открытой акваторией Геленджикской бухты, описан характер распределения характеристик поля ветрового волнения в период опасных гидрометеорологических явлений (бора, «шторм века» в ноябре 2023 г.), определена эффективность волногашения оцениваемой закрытой акватории Геленджикского порта. Была произведена оценка сезонной изменчивости волнения в изучаемой акватории.

В акватории Геленджикской бухты расположены важные объекты транспортного и курортного значения: грузовой и пассажирский порты, на побережье бухты расположен город-курорт Геленджик.

В качестве измерительного прибора использовался метеорологический комплекс МК 26. Метеорологический комплекс включал в себя датчик гидростатического давления, датчик температуры воды, а также датчик скорости и направления ветра. Датчики гидростатического давления и температуры воды были жестко зафиксированы на глубине минус 2 м БС. Датчик скорости ветра был установлен на высоте 2 м БС. Измерения велись с фиксацией данных через каждые полчаса. Датчики были установлены в ветровой и волновой тени Геленджикского порта для изучения эффективности волногашения.

Точность измерения гидростатического давления на МК 26 составляет 0,2 – 1,0%. Преобразование данных гидростатического давления в высоту поверхностного волнения осуществлялась автоматически. Спектральная технология обработки измерений датчика гидростатического давления основывается на теории ветрового волнения, созданной для условий открытого моря, в которой волнение на поверхности моря представляется в виде затухающего с глубиной гармонического колебания (линейная теория волн малой амплитуды в прибрежной морской зоне). Данный метод используется у ведущих иностранных производителей океанографического оборудования [6], метод апробирован экспериментально и описан в нескольких работах [3,4,5].

Из обрабатываемого ряда данных в автоматическом режиме исключалась постоянная составляющая (средний уровень по показаниям датчика); ряд раскладывался на гармонические составляющие преобразованием Фурье; определялись максимальная и минимальная частоты, которые использовались в расчетах; вносились поправки к коэффициентам преобразования Фурье в зависимости от глубины и частоты; производилось обратное преобразование Фурье; рассчитывались параметры волнения по восстановленной волнограмме на поверхности моря.

Период описываемых наблюдений в акватории Геленджикского порта – март 2023 г – февраль 2024 г.

Во время проявления «шторма века», наблюдаемого 26-27 ноября 2023 г., в Геленджикской бухте наблюдались порывы ветра до 24 м/с (западные и юго-юго-восточные ветры) и высота волн

достигала 5 м. Существующие портовые сооружения Геленджикского порта смогли проявить эффективность волногашения: максимальное волнение в марине по значениям высоты волны было в 5 раз меньше, чем в открытой акватории бухты (максимальная высота волны составила 1,1 м). Значения средней скорости ветра были на 0,5-1 м/с меньше, чем на фоновой метеостанции, что позволяет сделать вывод о снижении интенсивности ветровых потоков за счет трения о сооружения порта.

Характер распределения полученных максимальных высот волн согласуется с выводами, описанными в ранее выполненных работах по северной акватории Черного моря; максимальные значения волнения наблюдаются в осенне-зимние время [2], когда наиболее часты шторма и активизируются местные ветра («бора») [1].

Значимая высота волны H_s в марине Геленджикского порта составила 0,09 м, при том что в осенне-зимний период $H_s = 0,11$ м, а в весенне-летний $H_s = 0,08$ м.

Работа выполнена по заказу ФГУП "Росморпорт"

Список литературы

- 1) Гавриков А. В., Иванов А. Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование //Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 51. – №. 5. – С. 615-615.
- 2) Гишиус Ф. Н., Архипкин В. С. Многолетняя изменчивость штормового волнения на Черном море по результатам моделирования //Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2017. – №. 1. – С. 38-47.
- 3) Иволгин В. И. и др. Регистрация ветрового волнения донным датчиком гидростатического давления //Вестник российских университетов. Математика. – 2011. – Т. 16. – №. 5. – С. 1272-1275.
- 4) Кищенко А. А. Исследование алгоритма расчета параметров ветрового волнения по данным гидростатического уровнемера //Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2022. – №. 1. – С. 64-70.
- 5) Соколов В. А., Кищенко А. А. Экспериментальная проверка применимости теории волн малой амплитуды в условиях прибрежной морской зоны для расчетов характеристик ветрового волнения по данным измерений гидростатических мареографов //Труды Государственного океанографического института. – 2009. – №. 212. – С. 323-333.
- 6) SBE 26plus SEAGAUGE. Wave and Tide Recorder. User's Manual. Sea-Bird Electronics, USA (http://www.seabird.com/pdf_documents/manuals/26plus_010.pdf).

ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ОКЕАНА И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ С ЦИРКУЛЯЦИЕЙ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

Ангудович Я.И., Малинин В.Н.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северная Атлантика, уровень моря, течения, североатлантический антициклонический круговорот вод, субполярный циклонический круговорот, атлантическая меридиональная опрокидывающаяся циркуляция, изменчивость климата

Территории многих стран страдают от влияния штормовых нагонов, наводнений и роста количества паводковых дней. Изменения морского уровня и циркуляция океана влияют на эти явления и тесно связаны друг с другом [1]. Существует множество работ, посвященных взаимосвязи циркуляции и колебаний уровня в Северной Атлантике [2;3;4]. Циркуляция в Северной Атлантике (СА) представлена двумя мощными круговоротами вод: субтропический антициклонический круговорот вод (САКВ) и субполярный циклонический круговорот вод (СЦКВ). Основным механизмом, приводящим в движение антициклоническую циркуляцию в СА, являются пассаты, дующие с юга и западные ветра с севера. В результате объединения Флоридского и Антильского течения, образуется мощное течение Гольфстрим, являющееся частью теплой ветви Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОС). В северных широтах от 45° с.ш. до, примерно, 65° с.ш. простирается циклонический круговорот [5]. В результате создаваемой отрицательной плавучести, моря Лабрадор и Ирмингера характеризуются процессами глубокой конвекции, где образуется глубинное холодное противотечение АМОС [5] и Лабрадорская слабостратифицированная, опресненная водная масса [6].

Данная система циркуляции имеет огромное влияние не только на климат СА и сопредельные районы, но и способствует формированию глобального климата, обеспечивая постоянное перемешивание Мирового океана и перенося большие запасы тепла и энергии. Предметом исследования данной работы служат модельные значения уровня в Северной Атлантике архива реанализа Copernicus (SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047), ассимилированные по данным спутниковой альтиметрии, факторы определяющие колебания уровня (NAO, GSNW, АМО и др.), течение Гольфстрим и Атлантическая меридиональная опрокидывающаяся циркуляция (АМОЦ) по данным программы RAPID.

Изучению взаимосвязи уровня и циркуляции в СА посвящено множество работ, в числе которых [1]. В работе выполнен расчет межгодовых изменений уровня моря на широтном разрезе 26° для его отдельных участков и через всю СА в пределах 80 – 15° з.д. и показана высокая положительная корреляция между градиентами уровня Δh на крайних точках разрезов и его средними значениями h_{cp} с NAO. Статистическая параметризация среднегодовых значений переноса воды на широте 26° с.ш. на север и юг (АМОС и Q_{UMO}) по данным об уровне океана на этой широте позволила получить регрессионные уравнения, которые весьма точно (77 – 92 %) описывают дисперсию временных рядов АМОС и Q_{UMO} . В связи с этим можно предполагать, что для описания закономерностей циклонического круговорота вод также можно выделить широтный разрез, который наилучшим образом по данным градиентов уровня Δh и его средних значений h_{cp} должен быть связан с циркуляцией водных масс, с областями мощной глубоководной конвекции и с основными климатическими индексами СА.

Таким образом, в настоящей работе была рассмотрена взаимосвязь колебаний уровня в Северной Атлантике с циркуляцией в пределах субполярного циклонического круговорота вод (СЦКВ). Показано, что уровенный разрез на 56° с.ш. является репрезентативным в системе данной циркуляции и тесно связан с процессами глубокой конвекции в северных широтах, как по данным градиентов уровня (Δh), характеризующих геострофическую составляющую течений, так и по

средним значениям (h_{cp}). Статистическая параметризация переноса вод через широту 56° с.ш., позволила получить регрессионные модели меридионального переноса на север АМОС и обратного переноса Q_{UMO} в пределах СЦКВ. Значимые оценки коэффициентов корреляции с основными климатическими индексами, свидетельствуют о том, что колебания уровня являются показателем межгодовой изменчивости не только циркуляции вод, но и климата в Северной Атлантике.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Список литературы

- 1) Малинин В.Н., Ангудович Я.И. // Изменчивость уровня и циркуляции океана в Северной Атлантике по спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2022. Т. 19. №3. – С. 281–294 – DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-281-294.
- 2) Chafik L., Nilsen J.E., Dangendorf S., Reverdin G., Frederikse T. North Atlantic Ocean Circulation and Decadal Sea Level Change During the Altimetry Era // Scientific Reports. – 2019, № 9. – 1041. – Интернет-ресурс. Режим доступа: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37603-6>
- 3) Dong S., Baringer M.O., Goni G. J. Slow Down of the Gulf Stream during 1993–2016 // Scientific Reports. 2019. V. 9. Art. No. 6672. 10 p. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42820-8>.
- 4) Ezer T. Detecting changes in the transport of the Gulf Stream and the Atlantic overturning circulation from coastal sea level data: The extreme decline in 2009–2010 and estimated variations for 1935–2012 // Global and Planetary Change. 2015. V. 129. P. 23–36.
- 5) Rhein, M., Kieke, D., Huettl-Kabus, S., Rossler, A., Mertens, C., Meissner, R., Klein, B., Böning, C.W., Yashayaev, I., 2011. Deep water formation, the subpolar gyre, and the meridional overturning circulation in the subpolar North Atlantic. Deep-Sea Res. II Top. Stud. Oceanogr. 58 (17–18), 1819–1832.
- 6) Крашенинникова С. Б. // Водные массы и переносы тепла в Северной Атлантике // С. Б. Крашенинникова. – Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2019. – 124 с. ISBN 978-5-907162-84-6

ГРАВИТАЦИОННОЕ И ИНФРАГРАВИТАЦИОННОЕ МОРСКОЕ ВОЛНЕНИЕ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНО-ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

Антонов В.А., Долгих С.Г.

Тихоокеанский Океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: инфрагравитационные морские волны, ветровые морские волны, лазерный измеритель вариаций давления гидросферы.

В работе анализируются данные лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, разработанного и созданного в лаборатории «Физики Геосфер» Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН. Данный прибор создан на основе модифицированного равноплечего интерферометра Майкельсона [1]. С использованием в качестве источника света частотно-стабилизированного гелий-неонового лазера с долговременной стабильностью 10^{-9} . Чувствительным элементом прибора является круглая мембрана с зеркальным напылением, закрепленная по краям. С одной стороны она контактирует с водой, а с другой стороны она является частью интерферометра. При изменении давления мембрана прогибается в одну или другую сторону, тем самым изменяя длину измерительного плеча интерферометра. Далее изменение длины измерительного плеча с помощью системы регистрации передается на пишущий компьютер и преобразуется обратно в давление. Данный прибор позволяет регистрировать вариации давления гидросферы в частотном диапазоне от 0 (условно) до 10 000 Гц с точностью 50 мкПа. Для регистрации вариаций давления гидросферы лазерно-интерференционный прибор устанавливается на дно в месте регистрации. Перед включением с помощью компенсационной камеры мембрана приводится в нейтральное положение системой выравнивания внешнего давления. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы включается и начинается регистрация.

В сентябре 2010 г. лазерный измеритель вариаций давления гидросферы был установлен на шельфе Японского моря на базе МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца» на глубине 25 м. Данные с прибора по кабельной линии поступали на пишущий компьютер, где после предварительной обработки записывались на твердый носитель и пополняли базу экспериментальных данных. Для этой работы использовались данные с 06 по 26 сентября 2010 г., которые были записаны как часовые файлы с частотой 1000 Гц. При первоначальной обработке данные подвергались фильтрации низкочастотным фильтром с окном Хэмминга длиной 3000 до граничной частоты 1 Гц с последующей децимацией.

Гравитационное (ветровое) морское волнение анализировалось в диапазоне периодов от 4 до 30 с, а инфрагравитационное ветровое волнение анализировалось в диапазоне периодов от 30 до 5 мин. Инфрагравитационные волны — это поверхностные гравитационные волны состоящие как из ветровых волн, так и из зыби. Для анализа рассматривались спектры записей вариаций давления гидросферы, вызванные гравитационными и инфрагравитационными морскими волнами. На спектрах выделялись максимумы в диапазонах этих периодов. В результате обработки данных лазерного измерителя вариаций давления гидросферы было установлено, что максимумы гравитационного морского волнения находятся в диапазоне периодов от 6 до 12 с. в зависимости от скорости, направления и продолжительности ветра. Максимумы инфрагравитационного морского волнения находятся в диапазоне периодов от 4,5 до 5 мин. В результате было выявлено, что периоды инфрагравитационного морского волнения не зависят от величины основного периода гравитационного морского волнения. Данный вывод сделан из анализа спектров различных участков данных. В то время, как период ветрового волнения изменяется, подобного изменения периодов инфрагравитационных волн не наблюдается [2].

Анализ графиков изменения периода гравитационного и инфрагравитационного морского волнения показал, что при существенном изменении периодов ветрового волнения не наблюдается

резкого изменения периода инфрагравитационного морского волнения. Данный эффект наблюдается не только в открытой части Японского моря, но и в закрытой б. Витязь [3], что говорит о одинаковом механизме возбуждения этих волн.

Работа выполнена в лаборатории Нелинейной гидрофизики и природы катастроф ТОИ ДВО РАН по соглашению № 075–15-2022-1127 от 1 июля 2022 г.

Список литературы

- 1) Г.И. Долгих, С.С. Будрин, С.Г. Долгих, С.Н. Ковалев, А.А. Плотников, В.А. Чушин, В.А. Швец, С.В. Яковенко. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы в гидроакустических и океанологических исследованиях. //Подводные исследования и робототехника. 2007. №1(3), с. 40-45.
- 2) Г.И. Долгих, С. Г. Долгих, С.Н. Ковалев, И.А. Корень, В.В. Овчаренко, Е.Д. Холодкевич, В.А. Швец, С.В. Яковенко. Регистрация инфрагравитационных волн на границе гидросфералитосфера береговым лазерным дефармографом. // Доклады академии наук, 2003, том 389 № 2, с. 244 -246
- 3) С.В. Яковенко, В.А. Швец, С.С. Будрин // Региональные особенности инфрагравитационных морских волн в диапазоне от 20 до 300 с. //Гидросфера. Опасные процессы и явления. Том 3, вып. 4, 2021.

СТАТИЧЕСКОЕ УСВОЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИИ ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ПРОГНОЗОВ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Иванов В.А., Антюфриева Л.А., Вановский В.В.

Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», г. Москва

Ключевые слова: физика океана, ледовая обстановка, сплоченность льда, ассимиляция данных, усвоение данных, 3D-VAR, нейронные сети, вариационный автоэнкодер, латентное пространство.

В настоящее время происходит увеличение точности прогноза моделей атмосферы, океана и морского льда. Это связано с двумя факторами: с ростом количества вычислительных ресурсов (закон Мура), позволяющем увеличивать разрешение модели и детализировать мезомасштабные явления и ростом количества данных измерений (спутниковые данные, данные зондов, буев и метеостанций, т.д.). Задача усвоения (ассимиляции) данных стоит на стыке физически обоснованных моделей и данных измерений [1, 2].

Целью работы является увеличение точности оперативного прогнозирования ледовой обстановки путем усвоения спутниковых данных о сплоченности льда (данные альтиметрии Sentinel-3 SRAL) в физическое поле модели на базе NEMO ICE3, для оценки качества усвоения используются данные AMSR2.

Данные о сплоченности льда имеют ряд особенностей, затрудняющих применение классических алгоритмов ассимиляции данных (3D-VAR, фильтр Калмана, т.д.) для их усвоения: поле концентрации льда в отличие от атмосферных и океанических данных медленно меняется во времени и распределение значений концентрации льда существенно отличается от Гауссова. Кроме того, дополнительную сложность представляет формат данных измерений - они представляют собой спутниковые треки.

Нейронные сети применяются для модификации алгоритмов усвоения данных [3, 4, 5], но большинство работ использует модельные данные Lorenz-63 или Lorenz-96 и не привязывается к реальным данным.

В качестве базового алгоритма для усвоения данных выбран 3D-VAR[1, 2]. Ассимиляция данных происходит в латентном пространстве вариационного автоэнкодера, архитектура которого основана на архитектуре автоэнкодеров, используемых в генеративных диффузионных сетях [6] и использует механизм внимания для улучшения качества восстановления физического поля. Алгоритм тестируется на данных за 2019-2022 годы без подключения модели и дает улучшение точности поля сплоченности льда по MAE на 10-15%.

В дальнейшем планируется добавление динамики в алгоритм усвоения данных (адаптация 4D-VAR алгоритма) тестирование усвоение данных совместно с моделью оперативного прогноза ледовой обстановки.

Работа выполнена при поддержке Аналитического центра при Правительстве РФ (договор о субсидии 000000D730321P5Q0002, Грант № 70-2021-00145 от 02.11.2021).

Список литературы

- 1) Bannister R.N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariances // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2008. № 134. P. 1951–1970.

- 2) Bannister R.N. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. II: Modelling the forecast error covariance statistics // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2008. № 134. P. 1971–1996.
- 3) Barthelemy S. Brajard J., Bertino L., Counilon F. Super-resolution data assimilation // Ocean Dynamics. 2022. V. 72. P. 661–678.
- 4) Peyron M., Filion A., Gurol S., Marchais V., Gratton S., Boudier P., Goret G. Latent space data assimilation by using deep learning // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2021. V. 147, № 740. P. 3759–3777.
- 5) Fablet R., Chapron B., Drumetz L., Mémin E., Pannekoucke O., Rousseau F. Learning variational data assimilation models and solvers // Journal of advances in modeling Earth systems. 2021. V. 13. № 10.
- 6) Rombach R., Blattmann A., Lorenz D., Esser P., Ommer B. High-resolution image synthesis with latent diffusion models // IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2022. P. 10674–10685.

ВИХРЕВАЯ ДИНАМИКА ВБЛИЗИ ОСТРОВА НАДЕЖДЫ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Атаджанова О.А.¹, Козлов И.Е.¹, Коник А.А.², Плотников Е.В.¹, Медведева А.В.¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

²Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: вихри, остров Надежды, Баренцево море, радиолокация, прилив, субмезомасштаб

Вихревые структуры являются неотъемлемой частью циркуляции Мирового океана. В последние десятилетия изучению малых вихрей с масштабом от сотен метров до десятка километров — субмезомасштабом — посвящается все большее количество работ, что прежде всего связано с их влиянием на вертикальный и горизонтальный перенос и обмен тепла [3].

Исследование проявлений малых вихревых структур на радиолокационных изображениях активно проводится и для Баренцева моря. Показано [1], что вихри в летний период регистрируются на всей акватории. Для зимнего периода характерна их частая встречаемость в северной части моря вблизи острова Надежда. Этот остров находится на Шпицбергенской банке к юго-востоку от архипелага Шпицберген, длина острова составляет около 30 км, а максимальная ширина менее 2 км. По результатам моделирования [2] показано, что возле острова Надежды образуется диполь, который генерирует максимальные амплитуды подъема водной поверхности и сильное приливное течение вблизи южной и северной оконечностей острова. Что, в свою очередь, может приводить к генерации вихрей. Поэтому цель данной работы — выявить особенности вихревой динамики вблизи острова, в том числе подтвердить ее связь с приливной динамикой на основе большого массива данных (с января по декабрь 2018 г.).

Для исследуемой акватории было проанализировано 630 радиолокационных изображений с 1 января по 31 декабря 2018 г. в режимах съемки IW и EW. Методика заключалась в следующем. По РЛИ детектировались проявления вихревых структур вблизи острова. Регистрировались координаты центра, диаметр, тип вихря (циклонический, антициклонический) и механизм проявления — ледовый, когда в качестве трассера выступает лед, и пленочный/сдвигово-волновой, когда вихри регистрируются на открытой воде за счет наличия пленок. Дополнительно привлекались также данные о концентрации льда AMSR-2 с разрешением $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, изображения Sentinel-2 в оптическом диапазоне (490 нм) с разрешением 10 м, о скоростях приливных течений AOTIM5 с разрешением 4 км.

Всего в районе было зарегистрировано 231 проявление вихрей прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) (январь–май, декабрь) со средним диаметром 5,7 км, а также 40 проявлений вихрей открытой воды (ОВ) (январь, июнь–ноябрь) со средним диаметром 4,4 км.

Более 30 % от всех вихрей отмечалось в феврале, когда отмечались только вихри ПЛЗ и наблюдалась сильная изменчивость положения ледовой кромки в районе. Более подробный анализ вихрей ПЛЗ за февраль у северной (мыс Weisagen) и южной (мыс Kapp Thor) оконечностях острова Надежды показал следующее. Всего у северной оконечности было зарегистрировано 19 циклонов и 13 антициклонов, соответственно, 7 пар из которых отмечались в диполях. При этом средний диаметр циклонов был больше. У южной оконечности отмечалось 16 циклонов и 6 антициклонов, из которых 5 пар были диполями. Чаще всего вихри регистрировались у обоих мысов во вторую декаду исследуемого периода, с 9 по 18 февраля 2018 г. Тогда же больше всего было диполей. Ввиду того, что в основном разница между радиолокационными снимками по времени около суток (в отдельных случаях 50 мин. или 10 ч.), это не позволило оценить повторяемость одних и тех же вихрей на изображениях и оценить время существования этих проявлений. Поэтому дополнительно привлекались оптические изображения, которые позволили сократить время между

наблюдаемыми проявлениями до 6 часов (почти половина приливного цикла). Анализ отдельных вихревых проявлений для южной оконечности позволил выявить следующее: 1) проявлению вихрей с антициклоническим типом предшествовали максимальные скорости прилива, а с циклоническим – максимальные скорости отлива; 2) вихревые проявления существуют менее половины приливного цикла.

Работа выполнена в рамках госзадания МГИ РАН FNNN-2024-0017.

Список литературы

- 1) Atadzhanova O.A., Zimin A.V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2019. – V. 12. – No. 3. – P. 36–45.
- 2) Kowalik Z., Marchenko A. Tidal Motion Enhancement on Spitsbergen Bank, Barents Sea // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2023. – 128. 10.1029/2022JC018539.
- 3) Thomas L., Tandon A., Mahadevan A. Submesoscale processes and dynamics // *Ocean Modeling in an Eddying Regime*, *Geophys. Monogr. Ser.*, 2008. – V. 177. – P.17–38.

ПРИМЕНИМОСТЬ ОДНОМЕРНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ

Ахтамянов Р.А.^{1,2}, Гладских Д.С.^{1,3,4}, Мортиков Е.В.^{1,4,5}

¹Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²Гидрометцентр, г. Москва

³Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва

⁵Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

Ключевые слова: численное моделирование, трехмерная циркуляция, внутренний водоем, термогидродинамика, парниковые газы

Озера и водохранилища являются значимыми объектами исследования в различных научных дисциплинах, связанных с Землей. Взаимодействие озер с другими элементами Земной системы охватывает разнообразные пространственные и временные масштабы. Подобные водные объекты также играют важную роль в глобальных климатических моделях [1-3].

С точки зрения глобального моделирования представляют интерес особенности термогидродинамических и биохимических процессов в озерах и водохранилищах. Для достижения высокой точности моделирования, необходимо тщательно подобрать параметры калибровки модели, а также детализировать описание основных географических особенностей рельефа водохранилища в численной сетке модели. Это важно, поскольку от уровня детализации описания рельефа зависит степень дисперсии значений в трехмерной модели по сравнению с одномерными усреднениями. В современных климатических моделях часто применяются различные одномерные приближения для учета вклада озер в климатическую систему. Эти подходы предполагают разнообразные формы рельефа озера, часто описываемые в виде параллелепипедов или чаш. Используя трехмерную модель озера [4-6], возможно провести сравнение таких одномерных приближений с моделированием, учитывающим батиметрию с разной степенью детализации.

Цель исследования состояла в проведении анализа применимости одномерного подхода для описания термической структуры крупных внутренних водоемов. Для достижения этой цели предполагается выполнение следующих задач: проведение численного моделирования водных объектов с использованием трех различных методов для описания их геометрической формы и структуры. Этот подход позволит создать разнообразные конфигурации моделей озер с различной степенью детализации, что, в свою очередь, позволит провести сравнительный анализ и оценить влияние выбранного метода на результаты моделирования термической структуры и гидродинамики водоемов. Для осуществления указанных целей используется трехмерная численная модель термогидродинамики замкнутых водоемов [4-6], основанная на уравнениях термогидродинамики с применением приближения Буссинеска и гидростатики. Озеро Виктория и Рыбинское водохранилище представляют собой два уникальных объекта исследования в контексте моделирования термической структуры крупных внутренних водоемов. Выбор этих озер обоснован не только их географическими особенностями, но и различиями в климатических условиях и сезонной динамике термической структуры.

В ходе исследования планируется выявить влияние орографических особенностей на термическую динамику озер. Подробное описание рельефа дна может оказать существенное влияние на среднюю температуру поверхности водоема, что подчеркивает важность учета этого аспекта при моделировании озерных экосистем и их термической структуры.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-77-01032.

Список литературы

- 1) Tsuang B.-J., C.-J. Tu, and K. Arpe. Lake parameterization for climate models. - Report No. 316, Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 2001, 72 pp.
- 2) Ljungemyr P., Gustafsson N., Omstedt A. Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model // *Tellus A.* – 1996. – V. 48. – P. 608-621.
- 3) Tranvik L. J., Downing J. A., Cotner J. B., Loiselle S. A., Striegl R. G., Ballatore T. J., Dillon P., Knoll L. B., Kutser T et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // *Limnology and Oceanography* - 2009 – vol. 54. – pp. 2298-2314.
- 4) Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // *Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling.* – 2019. – V. 34, № 2. – P.1-14
- 5) Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // *Водные ресурсы.* – 2021. – Т. 48. № 2. – С. 155-163.
- 6) Gladskikh, D.S., Mortikov, E.V., Stepanenko, V.M. Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2020. – 611(1). – P. 012013.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОРСКОГО ЛЬДА НА ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН

Ахтямова А.Ф.^{1,2}, Новиков М.О.^{1,3}, Сухих Н.А.¹

¹ Центр морских исследований МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: моделирование, NEMO, SI³, морской лёд, Охотское море.

Моделирование морского льда является актуальной задачей в последние десятилетия в связи с глобальным изменением климата, развитием судоходства в арктических и субарктических морях, а также освоением шельфовой области и др. В данной работе для восстановления многолетней изменчивости (1992-2021 гг.) состояния морского льда (концентрация и толщина) использовалась гидродинамическая модель высокого разрешения NEMO 4.2.1 (Nucleus for European Modelling of the Ocean), в конфигурации автономного модуля взаимодействия океана и атмосферы – Stand-Alone-Surface (SAS) и использованием блока ледового покрова SI³ (Sea ice Modelling Integrated Initiative) [1].

Модуль SI³ предназначен для глобального и регионального применения и учитывает динамику и термодинамику льда, включения рассола и изменения толщины в подсеточном масштабе.

В работе использовались следующие данные для финальных расчетов:

- В качестве форсинга брались данные атмосферного реанализа ERA5: компоненты вектора скорости ветра на уровне 10 м, температура воздуха на уровне 2 м, температура точки росы на уровне 2 м, давление на уровне моря, количество твердых осадков, длинноволновая и коротковолновая нисходящая радиация, а также общее количество осадков. Дискретность – 1 час, разрешение – $0.25^\circ \times 0.25^\circ$;

- Данные гидротермодинамики океана – уровень моря, компоненты вектора скорости течений, температура и соленость воды были взяты из результатов моделирования Delft3D-FLOW для Охотского моря (пространственное разрешение около 4 км). Дополнительно подключался массив температуры поверхности океана OSTIA ($0.05^\circ \times 0.05^\circ$);

- В качестве начальных и граничных условий использовалась температура льда из реанализа ERA5, а также концентрация и толщина льда из океанического реанализа GLORYS12V1;

- Для получения информации о батиметрии использовались оцифрованные навигационные карты для района у побережья острова Сахалин, дополненные данными глобальной батиметрии Global Multi-Resolution Topography (GMRT) v4.0 (шаг $30'$);

Для оценки результатов экспериментов рассчитывались различные метрики, такие как RMS, RMSE, bias, интегрированная ошибка кромки льда и др. [2]. Данные для оценки качества моделирования: OSTIA (Global Ocean Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) – концентрация льда, SMOS Sea Ice Thickness – толщина льда. Также использовались ледовые карты АНИИ и ЕСИМО для визуального анализа результатов.

На этапе верификации модели производился подбор оптимальной конфигурации расчетной сетки, эксперименты с различными входными данными, выбор реологии и настройка параметризаций ледового модуля. Для финальных расчетов была выбрана прямоугольная и регулярная сетка с разрешением $0,03$ градуса. Основной параметризацией для реологии льда была выбрана EVP (elastic-viscous-plastic).

Для верификации были выбраны три ключевых периода, отражающих физический механизм образования/таяния морского льда: льдообразование (ноябрь), стабильный покров (февраль) и таяние (апрель-май). В процессе верификации были получены следующие выводы:

- Коэффициент трения между атмосферой и океаном cd_i влияет значительно на пространственное распределение ледовых параметров. Был принят равным 1.4×10^{-3} .

- Воздействие температуры и солёности воды на процессы термодинамики образования льда является определяющим. Подбор источника данных для этих параметров играет ключевую роль в достижении достоверных результатов. Так, продукт GLORYS12V1 довольно плохо воспроизводит поверхностную температуру и солёность, в отличие от Delft3D.

- Также на толщину льда значительно влияет параметризация торосистости (ridging/rafting), особенно ее коэффициент, зависящий от прочности льда – $pstar$. Приняли равным 2.0×10^4 Н/м².

- Коэффициент трения между льдом и океаном c_{io} влияет на скорость дрейфа, но незначительно меняет пространственное распределение ледовых параметров. Был принят равным 5×10^{-3} .

Анализ воспроизведения ледовых характеристик показал высокую достоверность модельных расчетов. Модель хорошо воспроизводит скорость нарастания и появления льда на акватории по сравнению с ледовыми картами. Заметим, что значения концентрации по модели NEMO более близки к ледовым картам ЕСИМО и ААНИИ, чем значения продуктов OSTIA и SMOS.

Рассмотрение результатов экспериментов в период стабильного покрова выявил, что модель демонстрирует завышение площади распространения льда, особенно заметное в проливе Лаперуза и Татарском проливе. В то же время, в регионах, которые представляют интерес, а именно в районе шельфа о. Сахалин, значения концентрации льда характеризуются точным воспроизведением, согласующимся как с ледовыми картами, так и с данными OSTIA. Отмечается небольшое завышение значений толщины льда по сравнению с ледовыми картами и SMOS. Также модель успешно воспроизводит постоянную полынью, расположенную к северо-востоку от Сахалина.

Наибольшие трудности в воспроизведении характеристик льда при данной конфигурации модели возникают в период таяния. Этот временной отрезок также представляет сложность в интерпретации данных дистанционного зондирования и их отражении на ледовых картах. Эта сложность обусловлена трудностями определения границы между водой и льдом в период активного образования снежиц. В некоторых случаях модель может демонстрировать более интенсивное таяние, чем наблюдалось в реальных условиях.

Общий вывод заключается в том, что ледовый модуль SI³ модели NEMO в конфигурации SAS успешно воспроизводит ледовые характеристики на протяжении большей части ледового сезона, за исключением периода таяния, когда отмечается занижение значений концентрации и толщины льда. Проведенная верификация подчеркивает значимую зависимость ледового модуля не только от коэффициентов параметризации ледовых процессов, но также от качества предоставляемых входных данных.

-

Список литературы

- 1) Vancoppenolle M., Rousset C., Blockley E., Aksenov Y., Feltham D., Fichefet T., et al. Sea Ice modelling Integrated Initiative (SI3) – the NEMO Sea Ice Engine // Scientific Notes of Climate Modelling Center, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), 2023. doi:10.5281/zenodo.1471689
- 2) Melsom A., Palerme C., Müller M. Validation metrics for ice edge position forecasts // Ocean Science. 2019. V. 15. P. 615–630. <https://doi.org/10.5194/os-15-615-2019>

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ КУПОЛА ГЛУБИННОЙ ВОДЫ МОРЯ УЭДЕЛЛА

Багатинская В.В.¹, Багатинский В.А.^{1,2,3,4}, Морозов Е.Г.⁴, Дианский Н.А.^{1,2,3}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Москва. Россия.

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН. Москва. Россия.

³Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова. Москва. Россия.

⁴Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН. Москва. Россия.

Ключевые слова: море Уэдделла, влияние ветра, термохалинный фактор, численная модель, INMOM

Проведен ряд исследований изменчивости глубинных и донных вод в море Уэдделла [1, 2], однако отсутствие четко определенных тенденций в свойствах этих вод привлекло внимание к процессам, которые могли бы контролировать характеристики вод при выходе из моря Уэдделла. Основываясь на гидрографических данных в море Скоша, [3, 4] предположили, что изменения интенсивности циклонического ветра над круговоротом Уэдделла могут повлиять на крутизну изопокических поверхностей в северной части моря Уэдделла и, следовательно, на температуру самой холодной воды, которая пересекает южный хребет Скоша. В работе была изучена сезонная изменчивость положения верхней границы глубинных вод моря Уэдделла в зависимости от напряжения трения ветра.

Для этого были проведены расчёты с помощью вихредопускающей глобальной версии INMOM-G025 с пространственным разрешением 0.25° . В качестве исходных данных по температуре и солёности использовались находящиеся в свободном доступе данные объективного анализа EN4, а для расчёта атмосферного воздействия – база данных JRA55-do. Для проведения расчётов с INMOM-G025 был выбран климатический период с 1993 по 2012 гг., так как для этого периода рассчитывалось большинство моделей средней динамической топографии, которые используются для верификации модели INMOM-G025.

С помощью INMOM-G025 были определены вклады ветрового и термохалинного факторов на динамику вод в море Уэдделла. Для этого были проведены расчёты среднего климатического состояния циркуляции вод Мирового океана, для февраля и августа, усредненных с 1993 по 2012 гг., методом диагноза-адаптации акад. А.С.Саркисяна.

Была изучена сезонная изменчивость положения верхней границы глубинных вод моря Уэдделла в зависимости от напряжения трения ветра. Было показано, что глубинные воды поднимаются вверх практически по всей области моря Уэдделла, причем в феврале подъем сильнее (летом Южного полушария), чем в августе. Это усиление хорошо отражается в виде подъема изотермы 0.1°C и образовании, так называемого, более теплого купола температуры. Наблюдаемый февральский купол температуры в море Уэдделла, в основном, формируется усилением циклонической завихренности ветра, и, следовательно, усилением дрейфовой циркуляции вод, приводящей к интенсификации подъема вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 22-17-00267.

Список литературы

- 1) Fahrbach, E., Hoppema, M., Rohardt, G., Schröder, M., and Wisotzki, A.: Decadal-scale variations of water mass properties in the deep Weddell Sea, *Ocean Dynam.*, 54, 77–91, doi:10.1007/s10236-003-0082-3, 2004.
- 2) Schröder, M. and Fahrbach, E.: On the structure and the transport of the eastern Weddell Gyre, *Deep-Sea Res. Pt. II*, 46, 501–527, doi:10.1016/S0967-0645(98)00112-X, 1999.

- 3) Meredith, M. P., et al. (2001), Deep and Bottom waters of the eastern Scotia Sea: Rapid changes in properties and circulation, *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 2157–2168, doi:10.1175/15200485(2001)0312.0.CO;2.
- 4) Meredith, M. P., Garabato, A. C. N., Gordon, A. L., & Johnson, G. C. (2008). Evolution of the Deep and Bottom Waters of the Scotia Sea, Southern Ocean, during 1995–2005*. *Journal of Climate*, 21(13), 3327–3343. doi:10.1175/2007jcli2238.1.

ГЕОСТРОФИЧЕСКАЯ И ВЕТРОВАЯ СОСТАВЛЯЮЩИЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЦИРКУМПОЛЯРНОГО ТЕЧЕНИЯ

Багатинский В.А.^{1,2,3,4}, Багатинская В.В.^{1,2}, Дианский Н.А.^{1,2,3}, Гусев В.А.^{2,3,4}, Морозов Е.Г.⁴

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова. Москва. Россия.

²Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН. Москва. Россия.

³Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова. Москва. Россия.

⁴Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН. Москва. Россия.

Ключевые слова: Антарктическое циркумполярное течение, влияние ветра, термохалинный фактор, численная модель, баротропная функция тока.

Многоструйная структура АЦТ впервые была описана в работах [1, 2]. В работе [3] выделены три основные струи: северная – течение мыса Горн, центральная – стрежень АЦТ, южная – течение из моря Беллинсгаузена. Однако, в [4] предложено описывать структуру АЦТ девятью, а в [5] 12 струями. АЦТ тесно связано с меридиональной термохалинной стратификацией Южного океана, которая формируется под воздействием длительного ветра и потоков тепла и пресной воды; оно также управляется рельефом дна и береговой линией. Структура АЦТ довольно сложна, и есть необходимость детального выяснения относительного вклада дрейфового и градиентного компонентов скорости в общую циркуляцию АЦТ.

В работе был изучен вклад ветрового и термохалинного факторов в формирование средней климатической структуры АЦТ с помощью численного моделирования с использованием модели общей циркуляции океана (МОЦО) INMOM в режиме диагноза-адаптации. Исследования проводились для летних (февраль) и зимних (август) условий.

Струя АЦТ, вызванная термохалинными факторами, ограничивается в приповерхностном слое температурным диапазоном $\sim 0-6^\circ\text{C}$ зимой и $\sim 3-9^\circ\text{C}$ летом. В приповерхностном слое АЦТ поворачивается влево (южное полушарие) согласно теории Экмана относительно направления ветрового напряжения. Из-за более сильных ветров зимой, отклик в скорости дрейфа сильнее, чем летом.

Показано, что, несмотря на сильные ветры над Южным океаном, термохалинный фактор образования АЦТ в целом намного больше, чем ветровой фактор. Тем не менее, вклад ветровой составляющей в увеличение зональной скорости в проливе Дрейка у Антарктиды может достигать в среднем 15-20% от термохалинной скорости в 20-метровом слое.

Влияние дрейфовой динамики на широтное изменение средней динамической топографии (СДТ) проявляется в том, что ветер способствует уменьшению СДТ более чем на 6 см от открытых океанических областей Южного океана до Антарктиды.

Влияние ветра на формирование баротропной функции тока (БФТ) более выражено, чем на СДТ. Интенсивность АЦТ из-за ветрового воздействия увеличивается в среднем на 9-11 Св в феврале и на 12-17 Св в августе. В то же время летом наибольшее усиление БФТ на 12 Св за счет ветра приурочено к сектору АЦТ к югу от Африки, а зимой на 18 Св к югу от Австралии. В проливе Дрейка ветровая составляющая возрастает меньше, чем над АЦТ в целом: на 8 Св летом и на 12 Св зимой.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 22-17-00267.

Список литературы

- 1) Burkov V.A. (1994) Antarctic jets. *Oceanology* 34:169–177.

- 2) Orsi A. H., Whitworth Th. III, Nowlin W.D. Jr. (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res* 42(5):641–673.
- 3) Антипов Н.Н., Данилов А.И., Клепиков А.В. Исследования Южного океана по научным программам ААНИИ: от программы «ПОЛЭКС-ЮГ» до ФЦП «МИРОВОЙ ОКЕАН» // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1 (99). С. 65-85.
- 4) Sokolov S., Rintoul S.R. Multiple Jets of the Antarctic Circumpolar Current South of Australia // *J. Phys. Oceanogr.* 2007. V. 37. № 5. P. 1394–1412.
- 5) Tarakanov R.Y., Gritsenko A.M. (2018) Jets of the Antarctic Circumpolar Current in the Drake Passage based on hydrographic section data. *Oceanology* 58(4):503–516

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

Бараненкова В.Д., Подрезова Н.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ледовитость, море Лаптевых, Арктика, суровость зим.

В работе исследуется межгодовая, а также сезонная изменчивость льда в море Лаптевых в зависимости от суровости зим. Для расчета суммы градусо-дней мороза (СГДМ), а также дальнейшего разделения зим по суровостям, исходными данными послужили среднесуточные значения температуры воздуха п.Тикси с 1936 по 2023 года (Гидрометцентр России) [1]. Ежемесячные значения площади льда моря Лаптевых с 1978 по 2023 года были выбраны с сайта Национального центра окружающей (США) [2]. Для сравнительного анализа ледовитости моря использовались ледовые карты с сайта Арктического и Антарктического Научно-Исследовательского Института (АНИИ) [3].

Оценка суровости зим для моря Лаптевых была рассчитана по сумме градусо-дней мороза с помощью кластерного анализа. В результате расчетов была получена следующая классификация зим: Мягкая зима – до 4900 СГДМ, Умеренная зима – 4901-5600 СГДМ, Суровая зима – более 5601 СГДМ. Минимальное значение – 4294 СГДМ зафиксировано зимой 2019-2020 года. Максимальное значение – 6210 СГДМ зафиксировано зимой 1940-1941 года. За исследуемый период умеренные зимы наблюдались в 60%, мягкие зимы составляли 22% и суровые – 18%. Можно отметить, что последний раз суровая зима в море Лаптевых наблюдалась в 2003-2004 года, а большинство мягких зим наблюдалось в последние 20 лет.

График среднегодовой ледовитости моря Лаптевых показывает отрицательный тренд, сокращение льда составляет 38000 км² за 10 лет. Для выявления предпочитаемого тренда – линейного или нелинейного, проводится оценка значимости, которая производится на основе оценки значимости тренда a_i по t-критерию Стьюдента. Для линейного тренда сравниваются критическое значение $t_{кр}=2.02$ и рассчитанное $t=7.23$. Для нелинейного $t_{кр}=2.02$ и рассчитанные $t_1=0.736$, $t_2=1.069$. Расчеты показывают, что значимым трендом является линейный.

В 1996 году наблюдалась максимальная среднегодовая площадь, занятая льдами, равная 0,84 млн.км². В 2020 году наблюдалась минимальная среднегодовая площадь, занятая льдами, равная 0,57 млн.км², что согласуется с минимальным значением СГДМ в этом же году. Отметим, что с 1978 до 2005 года колебания среднегодовой площади, занятой льдами, составляли в пределах от 0,67 до 0,84 млн.км². С 2005 по 2023 года колебания среднегодовой площади, занятой льдами, составляли уже от 0,57 до 0,76 млн.км².

Исследуя площадь льда по месяцам можно отметить, что наибольший отрицательный тренд наблюдается в сентябре. Наибольшая площадь льда в сентябре 1996 года составила 0,89 млн.км², в то время как в сентябре 2014 и 2020 льда всего 0,01 млн.км². Отрицательный тренд показывает сокращение льда на 120000 км² за 10 лет. В сентябре 2023 года отмечается увеличение площади льда до 0,43 млн.км². Для выявления предпочитаемого тренда линейного или нелинейного проводится оценка значимости, которая производится на основе оценки значимости тренда a_i по t-критерию Стьюдента. Для линейного тренда сравниваются критическое значение $t_{кр} = 1.96$ и рассчитанное $t=5.42$. Для нелинейного $t_{кр} = 1.96$ и рассчитанные $t_1=0.961$, $t_2=0.378$. Расчеты показывают, что значимым трендом является линейный.

В результате проведенного исследования, была выполнена оценка по суровости зим, а также выделили трендовые компоненты, которые показывают сокращение площади льда в море Лаптевых. Сравнительный анализ по месяцам показал, что наибольшее сокращение площади льда

происходит в сентябре. За последние 20 лет наблюдалась всего 1 суровая зима в 2003-2004 году, 10 умеренных и 9 мягких зим. Полученные результаты согласуются и с другими авторами [4,5].

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Список литературы

- 1) Библиотека климатических данных [сайт]. URL: <https://www.aisori.meteo.ru> (дата обращения: 24 декабря 2023)
- 2) National Centers for Environmental Information [сайт]. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/> (дата обращения: 24 декабря 2023)
- 3) Арктический и антарктический научно-исследовательский институт [сайт]. URL: <https://www.aari.ru/> (дата обращения: 19 декабря 2022)
- 4) Матвеева Т.А., Семенов В.А., Астафьева Е.С. Ледовитость арктических морей и её связь с приземной температурой воздуха в Северном полушарии. *Лёд и Снег*. 2020;60(1):134-148.
- 5) Бородачев В.Е., Бородачев И.В. Ледовитость моря Лаптевых в условиях колебаний климата Арктики. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016;(3):60-73.

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА О. САХАЛИН

Безделева А.А., Стасюк Е.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт»

Ключевые слова: физика океана, морской лед, шельф, о. Сахалин, фазы ледового режима, спутниковые данные

Шельф острова Сахалин признан богатейшей территорией России по запасам нефти и природного газа. Для разработки месторождений в последние десятилетия XX века было создано несколько проектов. Специфика разработки проектов по добыче углеводородов предусматривает круглогодичное транспортное судовое обслуживание, естественным препятствием для которого является ледяной покров. В связи с чем, особая роль отводится долгосрочным прогнозам, которые необходимы для заблаговременного планирования сроков навигаций, подготовки ледокольного флота и т.д. Особенно актуальными являются прогноз осенних (первое и устойчивое появление льда) и весенних (первое полное очищение и окончательное очищение ото льда) ледовых явлений.

Прогнозы ледовых явлений основываются на учете составляющих теплового баланса, климатических особенностей региона и влияние атмосферных процессов. Прогноз осенних ледовых явлений, процесса ледообразования, предсказывается по осенне-зимнему выхолаживанию, когда вода достигает температуры кристаллизации льда. Это наступает тем скорее, чем больше теплоотдача воды, что в свою очередь зависит от температуры воздушной массы, находящейся над акваторией, и чем меньше значение теплонакопления за прошедший теплый период, что выражается температурой воды. Прогноз весенних ледовых процессов определяет время наступления фаз ледового режима, которые связаны с моментом, когда тепловой баланс поверхности моря становится положительным. В дальнейшем инсоляция увеличивается и начинается таяние льда, скорость этого процесса находится в прямой зависимости от температуры воздуха над ним. Чем быстрее происходит таяние, тем быстрее очищается акватория ото льда. На этот процесс оказывают дополнительное влияние течения и ветер. Даты ледообразования и очищения моря определяются прежде всего тепловыми факторами; динамические процессы определяют дрейф и перераспределение льда в акватории. При этом для каждого естественного однородного района, присущи свои комбинации гидрометеорологических факторов, которые приводят к образованию характерных ледовых условий [1-4].

Целью работы является оценка корреляционных зависимостей между метеорологическими параметрами и фазами ледового режима – датами начала и окончания ледового периода, для трех точек северо-восточного шельфа о. Сахалин, где осуществляется активная деятельность по разведке и добыче нефтепродуктов.

Даты наступления фаз ледового режима были определены по спутниковым изображениям MODIS, Landsat, Santinel и VIIRS [5] для участков 26x26 км, с координатами центров: 52°55' с.ш. 143°29' в.д.; 52°42' с.ш. 143°33' в.д.; 51°24' с.ш. 143°39' в.д., и уточнены по данным прибрежных ледовых наблюдений.

Метеорологические параметры получены на основе данных реанализа ERA5 [6] для 236 точек. Для установления зависимостей использовались величины скорости зональной и меридиональной компонент ветра, сумм градусодней мороза и тепла за период с января 2002 г. по декабрь 2020 г. в узлах сетки реанализа (пространственное разрешение 0,25°) в районе северо-восточного шельфа о. Сахалин и акватории к северу от Амурского лимана с временным разрешением 5, 10 суток и 1 месяц.

По результатам корреляционного анализа для каждой фазы ледового режима, были выбраны наиболее существенные предикторы, которые в дальнейшем могут быть использованы для составления прогностических уравнений. Получены значимые коэффициенты корреляции между компонентами ветра (зональной и меридиональной) и датами первого и окончательного очищения акватории, что связано с преобладанием ветров северо-западных румбов в весенний период. А также между датами первого появления льда и суммой градусодней мороза в осенне-зимний период.

Список литературы

- 1) Тамбовский, В. С. Мониторинг состояния ледяного покрова для обеспечения морских операций при поисковом бурении на нефть и газ на северном шельфе о. Сахалин / В. С. Тамбовский, В. М. Пищальник // Лёд и снег. – 2010. – № 3(111). – С. 89-94.
- 2) Ростов И. Д., Плотников В. В., Ростов В. И., Вакульская Н. М. Информационно-справочная система «Режим и изменчивость состояния ледяного покрова дальневосточных морей // Метеорология и гидрология. – 2010. - №5. – С. 71-74.
- 3) Пищальник В. М., Иванов В. В., Трусков П.А. Прогноз вариаций площади ледяного покрова Охотского моря методом последовательных спектров // Известия ТИНРО. 2011. №165. – С. 158-171.
- 4) Плотников В. В., Дубина В. А., Вакульская Н. М., Пустошнова В. И. Режимные характеристики и особенности дрейфа льда на магаданском шельфе Охотского моря // Известия ТИНРО. 2016. №. 187. – С. 217-225
- 5) EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>
- 6) Climate Data Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era5-atmospheric-reanalysis>

ВИХРИ, ТРАССИРУЕМЫЕ ЛЬДОМ В ОБЛАСТИ ПРИКРОМОЧНОЙ ФРОНТАЛЬНОЙ ЗОНЫ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Благодатских Е.А.^{1,2,3}, Зимин А.В.^{2,4}, Козлов И.Е.³

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

³Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, радиолокационные изображения, спутниковые наблюдения, Полярная фронтальная зона, прикромочная ледовая зона, морской лед, Баренцево море, Карское море.

Вихри повсеместно распространены в Мировом океане и способствуют перемешиванию, переносу тепла, питательных веществ и других свойств воды [1]. Изучение свойств вихревых структур и причин их происхождения могут пролить свет на изменчивость пограничных слоев и фронтальных зон. Однако их исследование часто затруднено спонтанностью возникновения и достаточно ограниченным временем существования. Например, вихревые структуры в области прикромочной ледовой зоны (ПЛЗ) ранее активнее всего изучались на основе анализа данных спутникового дистанционного зондирования [2,3,4]. В последние годы для этих целей начали активно применяться методы машинного обучения [5]. Так или иначе, спутниковые данные позволяют в основном определять горизонтальные и кинематические характеристики вихрей [6], а их вертикальная структура остается малоизученной. Мезомасштабные вихри в ПЛЗ имеют ряд особенностей, которые отличают их от вихрей в открытом океане. Одной из основных особенностей мезомасштабных вихрей в ПЛЗ является их более высокая устойчивость. Это связано с тем, что ледяной покров затрудняет рассеивание энергии. В результате мезомасштабные вихри в ПЛЗ могут существовать в течение более длительного времени, чем в открытом океане. Одной из особенностей вихрей ПЛЗ является их вертикальная структура. Ледяной покров создает дополнительные градиенты плотности и температуры, которые влияют на динамику вод в вихре. В результате мезомасштабные вихри в ПЛЗ могут иметь более сложную форму и структуру, чем в открытом океане.

В настоящей работе исследуются характеристики вихрей, трассируемых льдом, в Карском и Баренцевом морях по данным контактных и дистанционных методов. Дистанционные данные были собраны за летний период 2023 года. Всего было отобрано 195 спутниковых радиолокационных изображений со спутника Sentinel-1A. Снимки были получены из базы данных Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu> (дата обращения: 27 декабря 2023 г.)) и обработаны с использованием ПО ESA SNAP и Mathworks ©MatLab. Контактные данные были получены в ходе экспедиции НИС «Дальние Зеленцы» по программе «Плавающий университет-2023» МФТИ в июле 2023 года. Работы вблизи и внутри вихревых структур были выполнены в северо-западной части Карского моря, а также в северо-восточной части Баренцева моря. Профили вертикального распределения температуры и солености морской воды по глубине были получены на основе измерений CTD-зонда CTD48M (Sea&Sun Technology, Германия).

Проведенный анализ спутниковых данных на предмет встречаемости вихревых структур в пределах ПЗЛ, показал, что вихревые структуры, трассируемые льдом, весьма распространенное явление. По данным за июль 2023 г. количество вихрей на снимках составило 690 штук, более 200 из которых трассируются льдом. В августе в районе исследований общее количество проявлений вихрей составило 355, из них ледовых – 86. Подробно рассмотрен случай проявления вихря в ПЛЗ в северо-восточной части Баренцева моря, в рамках которого вихревая структура была

зарегистрирована по данным контактных и спутниковых наблюдений. Антициклонический вихрь фиксировался на спутниковых изображениях с 20 июля 2023 г. С 20 по 23 июля 2023 г. он двигался с севера на юг, потом с 24 июля начал перемещаться в западном направлении. На траекторию движения вихревой структуры большее влияние оказывал приповерхностный ветер, чем подповерхностные течения. Диаметр вихря составлял 25–30 км. К моменту, начала контактных работ на разрезах 28 июля, он уже потерял свои четкие очертания и находился в стадии релаксации. Согласно расчетам по динамическому методу скорости разнонаправленных потоков внутри вихря в районе разрезов варьировались в пределах 4–20 см/с и достигали глубин 20–30 м. Полный анализ результатов будет представлен в докладе.

Контактные измерения были получены в рамках научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Анализ данных контактных наблюдений выполнен в рамках государственного задания № FMWE-2021-0014 (ИО РАН), а также № FNNN-2024-0017 (МГИ РАН).

Список литературы

- 1) Flor J.B. (ed.). Fronts, waves and vortices in geophysical flows. Springer, 2010. Т. 805.
- 2) Atadzhanova O.A., Zimin A.V. Analysis of the characteristics of the submesoscale eddy manifestations in the Barents, the Kara and the White Seas using satellite data // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*, 2019. – Т. 12. – №. 3. – С. 36-45.
- 3) Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A. Eddies in the Western Arctic Ocean from spaceborne SAR observations over open ocean and marginal ice zones // *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019. – Т. 124. – №. 9. – С. 6601-6616.
- 4) Morozov E.A., Kozlov I.E. Eddies in the Arctic Ocean Revealed from MODIS Optical Imagery // *Remote Sensing*, 2023. – Т. 15. – №. 6. – С. 1608.
- 5) Khachatryan E., Sandalyuk N., Lozou P. Eddy Detection in the Marginal Ice Zone with Sentinel1 Data Using YOLOv5 // *Remote Sensing*, 2023. – Т. 15. – №. 9. – С. 2244.
- 6) Kozlov I.E., Plotnikov E.V., Manucharyan G.E. Brief Communication: Mesoscale and submesoscale dynamics in the marginal ice zone from sequential synthetic aperture radar observations // *The Cryosphere*, 2020. – V.14. – P. 2941–2947, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2941-2020>.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВОГО ПОЛЯ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ НА МЕЛКОВОДНОМ УЧАСТКЕ В КАРСКОМ МОРЕ

Боджона С.Д.^{1,2}, Сидоров Д.Д.¹, Луньков А.А.¹

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

Ключевые слова: арктический шельф, шум ветрового волнения, неоднородное дно, вертикальная цепочка гидрофонов, численное моделирование, широкоугольное параболическое уравнение

Определение уровня окружающего морского шума - одна из классических и не теряющих своей актуальности задач в подводной акустике. На данный момент изучены характеристики окружающего шумового поля в большинстве значимых акваторий, однако освобожденная от многолетнего (нетающего) льда значительная часть арктического шельфа представляет собой новый регион для изысканий. В частности, особый интерес проявляют к Карскому морю, которое уже сейчас выступает важнейшим транспортным и промышленным центром, обеспечивая огромные перспективы в будущем.

По результатам сейсмической разведки в одной из его прибрежных мелководных областей глубиной около 30 м были получены данные о распределении скорости звука в верхнем осадочном слое [1]. Сильная неоднородность донной структуры выбранного участка, выражающаяся в неравномерном распределении скоростей (на некоторых участках скорость звука в дне сопоставима со скоростью звука в воде из-за присутствия небольшого количества газа в осадках), придаёт принципиальную значимость задаче об оценке пространственной изменчивости интенсивности и направленности окружающего морского шума.

В данной работе рассматривается один из его источников - ветровое волнение. Для частот звука около 500 Гц уровень подводного шума определяется главным образом силой ветрового волнения [2], при условии отсутствия льда и судоходства. Происхождение шума в таком случае в основном приповерхностное (вследствие обрушения гребней волн и других факторов) [3]. В работе [4] установлено, что отход льда, вызванный глобальным потеплением, стал причиной увеличения штормовой активности в Карском море почти в два раза за 41 год (1979-2019). При этом, средняя скорость ветра над ним в период с начала августа до конца сентября (в эти два месяца площадь льда в арктических морях считается минимальной) за два десятилетия (1996-2015) оставалась, в целом, неизменной и составляет примерно 7.5 м/с [5].

Для численного моделирования шумового поля ветрового волнения используется модель из монографии [2], в рамках которой рассматриваются приповерхностные низкочастотные источники (500 Гц) с заданной интенсивностью (около 50 дБ отн. 1 мкПа), произвольной фазой, и расположенные на расстоянии 1 м друг от друга по всем направлениям. В качестве приёмника шума выступает вертикальная цепочка гидрофонов (антенна), перегораживающая весь водный слой по глубине.

Поле шумовых источников вычислялось методом широкоугольного параболического уравнения с использованием принципа взаимности. Расчёты были проведены для трёх точек Карского моря с разными характеристиками дна: с высокой скоростью звука (акустически жёсткое дно), со скоростью, близкой к скорости звука в воде (водоподобное дно) и смешанный тип.

Получены оценки средней по глубине интенсивности шума, а также диаграммы направленности шума в горизонтальной и вертикальной плоскости. Результаты численного моделирования показали анизотропию шумового поля, в том числе в горизонтальной плоскости, и зависимость уровня шума от характеристик морского дна. Например, разница между максимальной и минимальной средней интенсивностью, рассчитанной для каждого горизонтального направления,

может составлять около 6 дБ. Это связано с тем, что звук сильнее затухает вдоль направлений с водоподобными донными осадками, как это было продемонстрировано в работе [6] для более низких частот.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121, <https://rscf.ru/project/22-72-10121/>

Список литературы

- 1) Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. Т. 64, № 3 С. 342–358.
- 2) Carey W.M., Evans R.B. Ocean ambient noise: measurement and theory. – Springer Science & Business Media, 2011.
- 3) Урик Р.Д. Основы гидроакустики. 1978.
- 4) Мысленков С.А., Платонов В.С., Сильвестрова К.П., Добролюбов С.А. Рост штормовой активности в Карском море с 1979 по 2019 г. по данным моделирования // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 498, № 2. С. 175–182.
- 5) Liu Q., Babanin A., Zieger S., Young I., Guan C. Wind and Wave Climate in the Arctic Ocean as Observed by Altimeters // J. Climate. 2016. V. 29, № 22. P. 7957–7975.
- 6) Grigorev V.A., Petnikov V.G., Lunkov A.A., Sidorov D.D. Modeling underwater sound propagation in an arctic shelf region with an inhomogeneous bottom // J. Acoust. Soc. Am. 2022. V. 151, № 4.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ЯВЛЕНИЕМ «ГОЛОС МОРЯ», ВОЗНИКАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ ПРОХОЖДЕНИЯ ТАЙФУНОВ ЧЕРЕЗ ЯПОНСКОЕ МОРЕ

Болсуновский М.А., Долгих Г.И., Чупин В.А.

Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Микросейсмы «Голос моря», инфразвуковые возмущения, лазерный деформограф, WaveWatch III, тайфуны.

В работе выполнено исследование возмущений, связанных с явлением «Голос моря», впервые обнаруженных В.В. Шулейкиным [1]. В настоящее время по вопросам механизма генерации и источника возникновения явления «Голос моря» существует ряд предположений, объясняющих природу происхождения данного явления. Актуальностью исследования является необходимость решения задач, связанных с возникновением и развитием низкочастотных процессов планетарного характера, возможного их влияния на жизнедеятельность человека. Целью исследования является поиск источника возникновения явления «Голос моря», а также определение механизма его генерации, посредством использования данных записи, выполненной лазерным деформографом.

Для проведения исследования использовались экспериментальные данные, полученные на двухкоординатном лазерном деформографе, установленном на морской экспериментальной станции (МЭС) «мыс Шульца» (Приморский край), а также данные спектральной дискретной волновой модели WaveWatch III. Исследуемые возмущения были обнаружены во время прохождения тайфунов Чан-Хом (2015 г.), Матмо (2014 г.), Хагупит (2020 г.) через Японское море. Также были использованы материалы исследований по пеленгу зон генерации микросейсм «Голос моря» [2].

По данным лазерного деформографа были выявлены микросейсмы первого и второго рода, определены периоды и длины волн атмосферных инфразвуковых возмущений «Голос моря», а также микросейсм «Голос моря». По данным волновой модели определены периоды волнения и длины волн в зонах предполагаемой генерации микросейсм «Голос моря», вблизи МЭС «мыс Шульца», а также в точках между зонами генерации микросейсм и МЭС. Проведено сравнение вычисленных волновых характеристик. Выполнено сравнение возможных механизмов генерации явления «Голос моря», а также полученных характеристик с предполагаемыми зонами источника генерации микросейсм «Голос моря».

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-17-00121 «Возникновение, развитие и трансформация геосферных процессов инфразвукового диапазона».

Список литературы

- 1) Шулейкин В.В. О голосе моря // ДАН. 1935. 3 (8). № 6. С. 259
- 2) Долгих Г.И., Чупин В.А., Гусев Е.С., Овчаренко В.В. ПЕЛЕНГ ЗОН ГЕНЕРАЦИИ МИКРОСЕЙСМ «ГОЛОСА МОРЯ». Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2021, Т. 501, № 2. 226-230. DOI: 10.31857/S2686739721120033

МОНИТОРИНГ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ АКВАТОРИИ ПЛЯЖА УНИВЕРСИТЕТСКОЙ НАБЕРЕЖНОЙ ДВФУ (БУХТА АЯКС) ЗА 2023-2024 ГГ.

Бородина А.П., Голубева Е.Н., Огородников Д.М.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

Ключевые слова: бухта Аякс, Университетская набережная ДВФУ, льдообразование, визуальное наблюдение, мониторинг прибрежной зоны.

Университетская набережная Дальневосточного федерального университета (ДВФУ) – это, востребованная в течении всего года, часть уникальной ландшафтно-парковой зоны на южном берегу бухты Аякс, построенная к саммиту АТЭС, в 2012 году.

Бухта Аякс расположена на острове Русский, который находится в заливе Петра Великого, на полуострове Сапёрный (северо-восточная часть острова). Между мысами Новосильского и Балка она вдаётся в южный берег пролива Босфор Восточный. Бухта Аякс состоит из трёх пляжей. В левой части бухты расположен пляж Аякс, центральная часть занята ДВФУ, правее расположен небольшой каменистый пляж. Протяженность бухты Аякс составляет 3,01 км. Бухта закрыта для гражданских судов.

Бухта Аякс имеет стратегическое значение, но в то же время Университетская набережная ДВФУ находится в рекреационной зоне, поэтому жители города часто выходят на лёд с целью подледной рыбной ловли. При этом наблюдения, проводимые за зимний период 2022-2023 гг. показали, что процессы льдообразования в бухте Аякс, в зависимости от метеорологических условий могут носить аномальный характер [1]. Однако, публикации, посвящённые исследованиям свойств морского льда и мониторинг ледовой обстановки вдоль Университетской набережной практически отсутствуют. Имеющиеся сведения относятся преимущественно ко льдам полярных районов. Между тем, известно, что от свойств льда зависят тепло- и газообмен через его поверхность, накопление биомассы и др. Информация об аналогичных исследованиях однолетних льдов в морской акватории Приморского края практически отсутствуют. Исходя из этого, целью данного этапа исследования является качественная и количественная характеристика ледовой обстановки в акватории Университетской набережной ДВФУ и соседствующей с ней акватории каменистого пляжа бухты Аякс в период льдообразования, которая выражалась в визуальных наблюдениях за ледовыми явлениями и формами ледяных образований (с фото и видео фиксацией); оценка степени покрытия бухты льдом.

Визуальные наблюдения за формами ледовых образований и ледовыми явлениями проводились с фото и видеофиксацией с 13 декабря 2023 года. В ходе наблюдений были получены следующие результаты: 1) период замерзания, по сравнению с прошлым годом начался на неделю раньше, в начале второй декады декабря. В течение первых трёх дней наблюдений сформировались забереги и начальные формы льда: ледяное сало и снежура [2]. На пляже Университетской набережной снежура в основном концентрировалась около левой части пирса. Вдоль каменистого пляже рядом процесс образования заберегов шёл менее интенсивно; 2) припай в акваториях обоих пляжей практически полностью сформировался к началу третьей декады декабря. По большей части он состоял из смёрзшегося битого льда, с участками ниласовых льдов, средней толщиной около 10 см, что соответствует светлому ниласу [2]. Битые льдины, сформировавшие припай, по краям бортов имели характерные для блинчатого льда валики из замёрзшей ледяной крошки, однако обладали неправильной формой с острыми углами, что не позволяет отнести их этой форме льда. Также вдали от береговых линий обоих пляжей, ближе к открытой воде оставалось несколько участков открытой воды, которые полностью затянулись через несколько дней. К концу декабря толщина льда у берега в среднем составляла 36 сантиметров, что, согласно классификации, соответствует

белому льду [2]; 3) в самом конце декабря произошло таяние льда до состояния ледяной каши в акватории восточного пляжа. Аналогичная ситуация наблюдалась и на пляже Университетской набережной в первых числах января.

Сравнение мониторинга ледообразования 2023-2024 гг. с динамикой ледяных образований 2022-2023 гг., в работе Безделева А.А. [1] позволяет выявить отличия. В предыдущем году образование различных форм льда происходило более аномально и быстро, начиная с ниласа и заканчивая дрейфующим льдом. В текущем году начальный период образования начался на неделю позже и шёл характерно для данного региона, за исключением конца декабря – начала января, когда произошло поочерёдно таяние припая и вынос образовавшихся при его разрушении ледяных структур в Амурский залив.

В ходе этой работы были отобраны пробы морского льда в кутовой и на прилегающих к пирсу частях пляжа Университетской набережной, измерена их температура *in situ* с использованием поверенных ртутных термометров. На базе лаборатории гидрологии суши ИМО ДВФУ определены солёность рефрактометрическим методом, общий вес растворённых твёрдых веществ, электропроводность и водородный показатель рН полученных в результате плавления рассолов.

В ходе измерений были получены следующие результаты: 1) температура льда в кутовой части ($-1,9^{\circ}\text{C}$) в момент отбора проб была выше, чем на участках, прилегающих к пирсу ($-3,2^{\circ}\text{C}$ для левой стороны пирса и $-2,0^{\circ}\text{C}$ – для правой); 2) общая солёность и плотность проб, отобранных в кутовой части (19‰ и $1,014\text{ г/см}^3$), оказались выше, чем у более окраинных проб, взятых у пирса (16‰ и $1,012\text{ г/см}^3$ для левой стороны пирса и 15‰ и $1,011\text{ г/см}^3$ – для правой); 3) значение рН всех отобранных проб оказалось практически одинаковым и изменялось в диапазоне от 8,6 до 8,7; 4) электропроводимость проб начиная с левой стороны пирса, по мере приближения к кутовой части пляжа постепенно уменьшалась (9378 мк/см для левой стороны пирса, 2035 мк/см для правой стороны пирса и 1454 для кутовой части); 5) вес общего растворённого вещества в пробах, отобранных в кутовой части (7270 ppm) практически в два-три раза превышает аналогичный параметр в правой (2035 ppm) и левой (4689 ppm) частях акватории относительно пирса набережной.

Эти наблюдения и измерения позволили существенно обогатить знания о процессах ледообразования и его характеристиках в данном прибрежном регионе и получить необходимый практический опыт, который будет применён в дальнейшем мониторинге.

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

- 1) Безделева, А.А. Динамика ледяных образований периода замерзания в бухте Аякс / А.А. Безделева // Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам / отв. ред. В.Ю. Ермаченко. – Владивосток, 2023. – С. 55–57.
- 2) Бушуев, А.В. Атлас ледовых образований / А.В. Бушуев, Н.А. Волков, В.С. Лоцилов. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. – 140 с.

ВЕРОЯТНОСТЬ ПОЯВЛЕНИЯ СТАРЫХ ЛЬДОВ НА ТРАССАХ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Бугук Г.М., Май Р.И.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северный морской путь, морской лёд, старый лёд, анализ полигонов.

Северный морской путь (СМП) становится все более важным для морского транзита, что обусловлено его стратегическим значением и экономическим потенциалом. Однако навигация по маршруту остается сложной, в первую очередь из-за ледовой обстановки. Многолетние ледяные образования при их значительной толщине представляют опасность, потенциально затрудняя или замедляя проход коммерческих и грузовых судов. Целью данного исследования является оценка вероятности встречи со старым льдом вдоль трассы СМП с учетом выбора месяца и маршрута.

В работе использован архив электронных ледовых карт АНИИ с недельной дискретностью за последние четверть века. В электронных ледовых картах формата SIGRID-3 хранятся контуры ледовых зон и информация о трех возрастных градациях льда для каждой ледовой зоны: частные сплоченности, возраст (толщина), форма (размеры) льда. Из каждой ледовой карты выделялись полигоны ледовых зон, где присутствуют старые льды любой сплоченности. Так как исходная информация (набор ледовых зон) представляет собой векторные полигоны, то и анализ такой информации целесообразно проводить с помощью алгоритмов, основанных на операциях с векторными полигонами (т.е. без промежуточной растровой аппроксимации) [1]. Этот алгоритм в том числе позволяет рассчитывать вероятность пересечения полигонов старых льдов.

В ходе исследования удалось оценить вероятность встречи старого льда на трассах СМП для различных сезонов. Установлено, что в восточном секторе СМП существует вероятность появления старых льдов, полностью перекрывающих судоходные трассы.

Был применён алгоритм, представляющий собой новый подход к статистическому анализу полигонов льда. Продемонстрированная эффективность алгоритма при анализе ледовых полигонов может проложить путь к его применению в более широком научном контексте, предполагая его адаптируемость к различным наборам пространственных данных. Результаты исследования могут улучшить наше понимание навигационной ситуации на трассах СМП, способствуя более точной оценке рисков для морской деятельности, особенно в контексте изменения ледовых условий.

-

Список литературы

- 1) Май Р.И. Повторяемость появления припая, вычисленная на основе анализа полигонов электронных ледовых карт (на примере Карского моря) / Май Р.И., Ганиева К.Р., Топаж А.Г., Юлин А.В. // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26, №5. – С. 29–40.

ЭВОЛЮЦИЯ ИТУРУПСКОГО АНТИЦИКЛОНА В КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЕ ПО СПУТНИКОВЫМ, МОДЕЛЬНЫМ И IN SITU ДАННЫМ

Булавинова В.И.¹, Будянский М.В.², Белоненко Т.В.¹, Дидов А.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток

Ключевые слова: Курильская котловина, антициклональные процессы, мезомасштабный антициклон, методы лагранжева моделирования

Курильская котловина расположена в южной части Охотского моря. Это наиболее глубоководная часть моря, где глубины превышают 3000 м, а наибольшая глубина составляет 3374 м. Циркуляция в юго-западной части Охотского моря представлена течением Соя, тёплые и солёные воды которого распространяются вдоль охотоморского побережья острова Хоккайдо от пролива Лаперуза до южных Курильских островов, и Восточно-Сахалинским течением, которое проходит вдоль восточного побережья острова Сахалин с севера на юг [1]. Характерная для Охотского моря циклоническая схема течений корректируется в южной части моря сложным рельефом дна и локальными особенностями динамики вод зоны Курильских проливов. Район Курильской котловины характеризуется повышенной мезомасштабной вихревой динамикой, где в любой период года одновременно сосуществуют несколько крупных циклонов и антициклонов с диаметрами 100–150 км [2]. Некоторые из них являются долгоживущими и имеют время жизни, превышающее несколько месяцев.

Целью данной работы является анализ структуры квазипостоянного антициклонического вихря, расположенного на траверзе острова Итуруп, и получившего название «Итурупский антициклон». Для достижения этой цели используются методы лагранжева моделирования [3] и эйлеровы подходы, заключающиеся в построении вертикальных разрезов через центр вихря и анализе поля течений на поверхности моря. Для периода июнь 2020 по январь 2023 г. рассчитывались так называемые, лагранжевы *S*- и *O*- карты, построенные по данным AVISO. Последовательность *S*-карт позволяет проследить эволюцию Итурупского антициклона в течение указанного периода, а *O*-карты дают информацию о происхождении вод в котловине.

Поля температуры и солёности рассчитывались по данным глобального океанического реанализа GLORYS12V1, основой которого является гидродинамическая модель NEMO (<http://marine.copernicus.eu/>), а также модели HYCOM. Для анализа также привлекались STD-съёмки, полученные в ходе 65 рейса НИС «Академик Опарин». Анализировался разрез через центр Итурупского антициклона по данным STD-измерений за 7-8 декабря 2022 г. и по данным GLORYS12V1 и HYCOM за те же даты. Центр вихря на момент выполнения STD-съёмок находился на 46.3 с.ш., 145.9 в.д.; его диаметр достигал порядка 200 км, а максимальные орбитальные скорости составляли 50 м/с. На станциях проводилось не только STD-зондирование, но также отбор проб на гидрохимические параметры и зоопланктон.

На основе анализа *S*-карт установлено, что горизонтальный масштаб Итурупского антициклона в период июнь 2020 – январь 2023 варьирует от 100-200 км. Итурупский антициклон существует в различное время года, однако наибольшие масштабы он приобретает в июле-декабре и характеризуется также и наибольшими орбитальными скоростями. В конце января, когда в море образуется значительный квазиоднородный слой, на поверхности вихрь в какой-то период может не проявляться, однако затем происходит его очередная регенерация, и вихрь снова появляется на *S*-картах. Центр антициклона, обозначенный на картах красным треугольником, перемещается в пределах котловины на незначительные расстояния от 46.3 с.ш., 145.9 в.д.

Анализ вертикальных разрезов по данным GLORYS12V1, HYCOM и STD-измерениям показывает, что антициклон хорошо прослеживается 7-8 декабря, его ядро расположено в слое от 150

до 600 м. Анализ показывает, что ядро антициклона состоит из холодных и относительно пресных вод по сравнению с окружающими на тех же горизонтах. Температура в ядре понижена на 2-4° С, а разница в солености достигает 0.5. Это означает, что Итурупский антициклон образован холодными и пресными водами, имеющими происхождение в Восточно-Сахалинском течении, и частично водами Ойясио. Данный вывод подтверждается О-картами. Воды течения Соя также присутствуют в структуре Итурупского вихря, как видно на О-картах, но анализ вертикальных распределений свидетельствует, что доминирующий вклад в его структуру дают холодные и более пресные воды. Это подтверждается полученным ранее выводом о том, что воды Японского моря (ветвь течения Соя) оказывают влияние на воды Охотского моря лишь в незначительной степени [4].

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №23-17-00068.

Список литературы

- 1) Власова Г.А., Васильев А.С., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость структуры и динамики вод Охотского моря // ДВО РАН; Гос. океаногр. ин-т Росгидромета; Сахал. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии Росрыболовства. – М. Наука, 2008. – 359 с.
- 2) Булатов Н.В., Куренная Л.А., Муктепавел Л.П. и др. Вихревая структура вод южной части Охотского моря и ее сезонная изменчивость (результаты спутникового мониторинга) // Океанология, 1999. – Т. 39. – № 1. – С. 36–45.
- 3) Prants S.V. Uleysky M.Yu., Budyansky M.V., 2017. Lagrangian Oceanography: Large-scale Transport and Mixing in the Ocean. Physics of Earth and Space Environments. Springer-Verlag: Berlin, Germany, 2017.
- 4) Морошкин К.В. Водные массы Охотского моря. М., 1966. 65 с.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМ КОМПЛЕКСОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИСКРОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Буланов А.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им.
В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток*

Ключевые слова: оптика океана, лазерно-искровая спектроскопия, ультразвук

В условиях увеличивающегося воздействия человека на экосистемы и введения международных углеродных налогов становится крайне важным изучение потоков, выбросов и "захоронения" углекислого газа в различных средах, а также создание соответствующих "карбоновых полигонов". Применение методов оптической спектроскопии позволяет осуществлять непрерывный мониторинг многих характеристик окружающей среды в реальном времени, как непосредственно на месте, так и на расстоянии. Для решения целого ряда фундаментальных и прикладных задач необходимы регулярные измерения, производимые в водном толще. Применение метода искровой и лазерно-искровой спектроскопии (ЛИС) для элементного анализа жидкостей в океанологических исследованиях является актуальным исследованием, но сопровождается с определенными трудностями. Для решения задач исследования Мирового океана был разработан автоматизированный комплекс исследования спектральных оптических характеристик и гидрофизических характеристик верхнего слоя моря проточным методом, который позволяет провести изучение изменчивости оптической и гидрофизической структуры морской среды вдоль трассы судна, пересекающей различные водные массы.

В целях регистрации оптических данных был использован специально разработанный искровой комплекс [1]. Для анализа полученных спектральных данных была создана программа на языке программирования Python, предназначенная для обработки и визуализации статистических данных лазерного пробоя. Входными данными для программы являлись наборы файлов изображения спектра пробоя данных типа *.csv, сформированные с помощью STM32 и переданные на микрокомпьютер через последовательный порт. В программе указывалась длина волны монохроматора при регистрации оптического пробоя. В итоге была получена зависимость интенсивности спектральных линий химических элементов, таких как натрий и кальций, при оптическом пробое в аэрозольном облаке из толщи морской воды посредством ультразвука. Чтобы одновременно регистрировать данные была разработана методика использования микрокомпьютера, который собирает гидрофизические данные через термосолонограф SBE-45 фирмы SeaBird. Последний при подачи питания начинает передавать через последовательный порт данные по температуре, проводимости и солености. Кроме того, для учета вклада в гидрофизическую структуру верхнего слоя океана атмосферных возмущений используются данные, полученные с датчиков, учитывающих состояние поверхности океана, атмосферы и ветра (параметры волнения, давление, скорость и направление ветра, температуру, влажность) [1]. Измерения расшифровываются в режиме реального времени и записываются в базу данных временных рядов influxdb. Далее данные отображаются в реальном времени через web -интерфейс, и в дальнейшем объединяются по временному признаку и формируются в многомерный машинно-независимый научный формат файлов netCDF. Его в дальнейшем можно просматривать и анализировать большим количеством программ таких как ODV, Matlab и др.

Кроме выше перечисленных экспериментальных методов исследования вещества в задачах улучшения чувствительности ЛИС спектроскопии, была решена проблема обработки большого количества данных, поступающих в реальном времени. Необходимо отметить, что оперативная обработка многочисленных спектров, полученных в результате измерений оптического пробоя, связана с проведением детального анализа и представляет в значительном числе случаев трудоемкую процедуру. Стремительное развитие актуальных тенденций, связанных с использованием нейросетей и алгоритмов машинного обучения могло бы прийти на помощь и позволило бы выполнить более точную классификацию, регрессию, кластеризацию и другие операции с выборками для получения информации о спектре и исследовании вещества.

Для дальнейшего повышения чувствительности метода ЛИС предложен анализ сигналов пробоя с применением искусственных нейронных сетей (ИНС), который использовался для оценки вклада растворенного органического и неорганического углерода в карбоновом полигоне [2].

Резюмируя, полученные исследования лазерного пробоя позволили сформулировать основные принципы создания метода комбинированной ультразвуковой лазерной искровой спектроскопии и создать компактный автоматизированный комплекс для изучения спектральных оптических и гидрофизических характеристик верхнего слоя моря с использованием проточного метода. Этот комплекс успешно прошел проверку в экспедиционных условиях в ходе рейса №81 НИС "Профессор Гагаринский" в Японском море в августе 2022 года, а также во время 52-го рейса НИС "Академик Борис Петров" в Атлантическом океане и в плюме реки Амазонки в октябре - декабре 2022 года [1].

Кроме того, на реальном примере углеродного анализа морской среды продемонстрировано успешное применение ИНС, которое позволило частично компенсировать матричные эффекты и самопоглощение при анализе искровых спектров и повысить чувствительность метода ЛИС [2]. Предложенный метод использования ИНС для распознавания сложных спектральных характеристик в задачах ЛИС в режиме реального времени позволяет делать оценку экологичности морских акваторий при мониторинге и исследованиях in-situ. Данный комплекс и методика может иметь большое значение для понимания изменений в составе и свойствах морской воды, а также для изучения экологических процессов, происходящих в данных регионах. Полученные данные могут помочь улучшить наше понимание состояния морских экосистем и динамики изменений в морских водах в различных точках мирового океана.

Работа выполнена в рамках проекта госзадания № FWMM-2024-0032.

Список литературы

- 1) Буланов А.В., Крикун В.А. О возможности элементарного анализа в задачах мониторинга морских акваторий с применением ультразвуковой искровой спектроскопии. Доклады российской академии наук. //Науки о Земле 513, вып. 2. 2023. С. 95–101.
- 2) Буланов А.В. Возможность распознавания сложных спектральных характеристик оптического пробоя с использованием нейронных сетей». Письма в журнал технической физики №2 (50). 2024. С. 10-12.

“БОРЕЙ” – ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС С ЭЛЕМЕНТАМИ ИИ ДЛЯ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РЕГИОНЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Вановский В.В.¹, Григорьев Т.А.¹, Иванов В.А.¹, Явич Н.Б.¹, Чесноков А.А.¹, Дрозд И.Д.¹,
Голиков В.А.¹, Марченко А.С.¹, Бурнаев Е.В.¹, Веземская П.С.², Гавриков А.В.²,
Креницкий М.А.², Шармар В.Д.², Гулев С.К.²

¹Сколковский институт науки и технологий, г. Москва

²Институт океанологии РАН им. П.П. Ширшова, г. Москва

Ключевые слова: моделирование океана, прогноз ледовой обстановки, сплоченность льда, NEMO, SI3, WRF, WW3, сверточные нейронные сети, СМП, форсинг.

В настоящее время Арктика является быстро развивающимся регионом, экономическое значение которого значимо возрастает вместе с увеличением доступности Северного морского пути (СМП) [1] для грузоперевозок между Европой и Азией. Так, предполагаемое снижение выбросов углекислого газа судов при плавании по СМП по сравнению с классическим путем через Суэцкий канал составляет 24%. Однако, несмотря на наблюдаемое в последние 40 лет стремительное потепление в Арктике, приведшее к сокращению площади морского льда более чем на 30% [2] и значительному уменьшению толщины морского льда [3], навигация в акватории Северного Ледовитого океана все еще осложнена тяжелой ледовой обстановкой большую часть года. Для обеспечения круглогодичной навигации по СМП и другой арктической хозяйственной деятельности требуются надежные прогнозы ледовой обстановки (сплоченность, толщина и дрейф льда), а также погоды и течений.

Нами была разработана новая комплексная региональная модель Баренцева и Карского морей “Борей”, работающая на основе связки моделей NEMO+SI3, WRF и WW3. Для моделирования океана используется конфигурация NEMO 4.0.7 1/12° под названием BARKA12, с интегрированной моделью морского льда SI3, принимающей на вход данные GLORYS. Атмосферный форсинг обеспечивается моделью WRF в 6-километровом разрешении, использующей в качестве входных параметров оперативный прогноз GFS. Модель WW3 обеспечивает моделирование ветрового волнения. Модели запускаются в следующем порядке: 1. WRF; 2. NEMO+SI3; 3. WW3. Также система допускает модификацию для каплинга моделей океана и льдов с моделью ветрового волнения.

“Борей” работает в режиме как сквозного расчета (hindcast), так и в полностью автоматизированной оперативной постановке с ежедневным прогнозом ледовой обстановки, течений, погоды и волн на трое суток вперед. Параметры модели морского льда настраиваются в соответствии с имеющимися данными наблюдений с помощью методов оптимизации машинного обучения по специально разработанным метрикам. Валидация модели BARKA12 проведена по данным буев Арго, спутниковых данных SST, SSS и SSH, а также по данным экспедиционных гидрографических разрезов за 2021-2022 года. Прогнозы ледовой обстановки провалидированы по данным GLORYS, AMSR-2 и Sentinel-3 и показали хорошее количественное совпадение с использованными источниками (в первую очередь, спутниковыми данными) по сплоченности льда (на уровне 80% оправдываемости прогнозов), а также неплохое сравнение на качественном уровне с неинтерпретированными спутниковыми снимками.

В комплекс включены либо находятся в процессе включения следующие разработанные элементы искусственного интеллекта (ИИ): 1. повышение разрешения модели погоды с 6 км до 3 км; 2. система ассимиляции данных на основе вариационного автоэнкодера, заменяющая классические алгоритмы усвоения данных; 3. нейронная параметризация солнечной радиации внутри модели WRF; 4. настройка параметров модели с помощью методов машинного обучения; 5. статистическая

коррекция прогнозов погоды на данные наблюдений. Благодаря использованию элементов ИИ может быть достигнут необходимый баланс между производительностью системы и ее качеством, позволяющий эффективно моделировать большой регион в высоком разрешении на ограниченных вычислительных ресурсах, например, моделировать весь СМП в разрешении 3-5 км. Например, повышение разрешения прогнозов погоды в два раза позволяет ускорить расчет наиболее вычислительно сложной модели WRF где-то в 8 раз, а применение технологий ИИ позволяет сделать это без серьезных потерь качества.

Работа выполнена при поддержке Аналитического центра при Правительстве РФ (договор о субсидии 000000D730321P5Q0002, Грант № 70-2021-00145 от 02.11.2021).

Список литературы

- 1) Мохов И.И., Хон В.Ч., Прокофьева М.А. Новые модельные оценки изменений продолжительности навигационного периода для Северного морского пути в XXI веке // Доклады Академии наук 2016. Т. 468, № 6. С. 699–699.
- 2) Alexeev V.A. et al. North Atlantic warming and declining volume of arctic sea ice // The Cryosphere Discussions. 2013. V. 7, № 1. P. 245–265.
- 3) Renner A.H.H. et al. Evidence of Arctic sea ice thinning from direct observations // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41, № 14. P. 5029–5036.

ОСОБЕННОСТИ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В КОНЦЕ XX - НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Виноградов М.В.^{1,2}, Захарчук Е.А.¹, Тихонова Н.А.^{1,2}, Сухачёв В.Н.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург;

² Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, Балтийское море, сезонная изменчивость, уровень моря.

В настоящее время в Мировом океане отмечается тенденция к активному (порядка $3,30 \pm 0,3$ мм/год) росту среднего уровня моря, вызванная процессом глобального потепления климата [1]. Это способно привести к угрозе затопления прибрежных территорий в среднесрочной перспективе. При этом существуют такие густонаселённые районы, где ожидаемый подъём уровня оказывается ещё больше, что создаёт потенциальную угрозу местному населению.

К числу таких наиболее уязвимых регионов можно отнести и Балтийское море, для которого отмечается значительное повышение абсолютного уровня моря – средним, примерно на $4,00 \pm 0,5$ мм/год [2]. Кроме того, эта акватория также характеризуется выраженной межгодовой изменчивостью уровня моря [3], причины которой до сих пор остаются слабо изученными. Данная же работа как раз имеет целью прояснение этого вопроса. В ходе исследования были получены сведения о межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря за последние 30 лет, выявлены её пространственно-временные особенности, а также выделены основные факторы, обуславливающие эту изменчивость.

В качестве исходных данных были использованы данные дистанционного зондирования Земли за период 1993-2021 гг., полученные с дискретностью в 1 сутки. Колебания уровня моря воспроизводятся продуктом спутниковой альтиметрии AVISO (разрешение $0.25 \times 0.25^\circ$). Океанологические факторы (водообмен в Датских проливах, стерические колебания уровня) рассчитывались по горизонтальным скоростям течения, температуре и солёности морской воды, взятым из модели морского реанализа Baltic Sea Physics Analysis and Forecast (разрешение 0.125×0.125 , 56 горизонтов). Метеорологические факторы (атмосферное давление, горизонтальные составляющие ветра, количество осадков, испарение и речной сток) были извлечены из модели атмосферного реанализа ERA-5 (разрешение 0.25×0.25).

Для исследования сезонной изменчивости уровня моря производился гармонический анализ 4-х гармоник сезонного хода (годовой – 365.2 дней, полугодовой – 182.6 дней, треть-годовой – 121.8 дней, четверть-годовой – 91.3 дней) в стационарном и нестационарном приближениях. В стационарном приближении сезонные колебания рассчитывались методом наименьших квадратов (амплитуда и фаза) для всего периода наблюдений. В нестационарном же приближении сезонность уровня моря вычислялась с помощью скользящего Фурье анализа. Межгодовые аномалии сезонного хода уровня моря рассчитывались посредством вычитания стационарных рядов из их нестационарных аналогов.

Влияние различных гидрометеорологических параметров на уровень Балтийского моря оценивалось на основании теоретических представлений о его крупномасштабной изменчивости, в соответствии с которыми локальные колебания уровня моря описываются 3-мя группами факторов: динамическими процессами в среде, стерическими колебаниями уровня и изменениями в составляющих водного баланса [4]. Для этого был проведён взаимно-корреляционный анализ колебаний уровня моря с его гидрометеорологическими предикторами, а также множественный регрессионный анализ.

Результаты исследования показали, что Балтийском море обладают достаточно выраженными сезонными колебаниями уровня. При стационарном приближения их амплитуды находятся в пределах 4,0-11,0 см – для годовой гармоники, 1,0-7,0 см – для полугодовой гармоники, 1,0-2,0

см – для треть- и четверть-годовых гармоник. В нестационарном же приближении амплитуды сезонных гармоник (особенно короткопериодных) значительно возрастают и могут достигать до 15,0-20,0 см. При этом, в акватории Балтийского моря, за исключением полугодовой гармоник, отмечается тенденция к постепенному росту (от 0,5 до 1,5-2,0 мм/год) амплитуды сезонных колебаний уровня моря, закономерно усиливающаяся в сторону северной части моря. Вследствие этого, межгодовые аномалии сезонного хода уровня в Балтике имеют довольно широких диапазон изменчивости: основная их часть лежит в абсолютных пределах около 10 см, хотя в отдельные годы может достигать и 20 см.

Взаимно-корреляционный анализ показал высокую ($|R| > 0,6$) связь межгодовых аномалий сезонного хода уровня моря лишь с аномалиями скорости ветра, атмосферного давления, а также водообмена в Датских проливах. При этом наблюдается выраженная закономерность в пространственной локализации максимумов их корреляции: для скорости ветра это юго-запад моря, для атмосферного давления – север моря, а для водообмена корреляция оказывается относительно равномерно распределена по всей акватории.

Множественный регрессионный анализ не только подтвердил результаты взаимно-корреляционного анализа, но позволил получить количественные оценки вклада 3-х основных гидрометеорологических факторов в межгодовую изменчивость сезонных колебаний уровня Балтийского моря. Так, максимальный вклад ветровой нагрузки в юго-западной части моря изменяется от 45-50 до 65-70 %, закономерно увеличиваясь с периодом гармоник. Атмосферное же давление способно вносить от 25-35 до 30-40 % в общую дисперсию уровня (север моря), неравномерно усиливаясь с ростом периода. Наконец, водообмен с Северным морем вносит порядка 25-30 % в изменчивость уровня почти на всей акватории моря, слегка усиливая своё влияние (до 35-40 %) на юге Ботнического залива и существенно снижая его на более низких частотах.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 22-27-00209 «Пространственная структура и механизмы межгодовой изменчивости сезонных колебаний уровня Балтийского моря».

Список литературы

- 1) Guérou, A. et al. Current Observed Global Mean Sea Level Rise and Acceleration Estimated from Satellite Altimetry and the Associated Measurement Uncertainty. *Ocean Science* 19 (2). -2023 г.
- 2) Madsen K. Sea Level Trends and Variability of the Baltic Sea From 2D Statistical Reconstruction and Altimetry// *Frontiers in Earth Science*. - 2019 г.
- 3) Ekman M. Extreme annual mean in the Baltic Sea level during 200 years: *Summer Institute for Historical Geophysics*, -1996 г.
- 4) Lisitzin, E. *Sea-Level Changes*. Elsevier. -1974.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ В РАЙОНЕ ПОРТА АКТАУ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СЦЕНАРИЯХ БУДУЩЕГО КЛИМАТА ДО 2055 ГОДА

Галаева А.В., Ивкина Н.И., Наурызбаева Ж.К., Долгих С.А.

АО "Институт географии и водной безопасности", г. Алматы, Казахстан

Ключевые слова: Каспийское море, уровень воды, изменение климата.

При проведении исследования был использован метод статистического анализа, основанный на выявлении взаимосвязи колебаний фонового уровня Каспийского моря и его сезонных флуктуаций с климатическими факторами, между характеристиками водного баланса с метеорологическими и климатическими факторами. Выполнялась статистическая обработка гидрологических характеристик (уровень воды, объем стока, слой стока) выявлялась неоднородность рядов в форме разностно-интегральных кривых. Также был использован метод гидрологического моделирования уровня моря, основанный на уравнении водного баланса, с использованием модели Community Land Model, в основу которой заложена концепция экологической климатологии. [1]

В ходе исследования было проанализировано изменение уровня Каспийского моря за период систематических наблюдений с 1900 г. по 2022 г. Уровень моря изменялся от минус 25,74 м БС до минус 29,01 м БС. Начиная с 2006 г. уровень Каспийского моря имеет устойчивую тенденцию к снижению. Интенсивность падения составляет в среднем 10 см в год, но в отдельные годы, ее величина составляла более 15 см: 25 см в 2011 г., 24 см в 2015 г., 17 см в 2019 г., 21 см в 2021 г. и 24 см в 2022 г. [2]

Следующей задачей было нахождение соответствия между уровнем района исследования и фоновым уровнем Каспийского моря. Для этой цели была выявлена зависимость среднего уровня по МГ Актау и фонового уровня Каспийского моря, и определено уравнение аппроксимации. Как следует из полученной зависимости, различия незначительны и средний фоновый уровень моря соответствует уровню в районе исследования. Отметка среднемноголетнего уровня в районе г. Актау составляет минус 27,91 м БС. Максимальный подъем до отметки минус 26,33 м БС отмечался в 1995 г., а минимальный спад до отметки минус 29,07 м БС – в 2022 г.

При исследовании влияний будущих изменений климата на уровень Каспийского моря необходимо учитывать разнообразные факторы. Это метеорологические факторы (атмосферная циркуляция, осадки и эвапотранспирация на водосборе), гидрологические (сток впадающих рек и видимое испарение), а также антропогенные факторы (регулирование стока рек и изменение свойств подстилающей поверхности с хозяйственными целями). Для реализации поставленной задачи по моделированию уровня воды на перспективу, было проведено исследование климатических характеристик в зоне исследуемого района. Климатические характеристики исследовались как за исторический период, так и на перспективу до 2055 года, используя сценарии изменения климата RCP4.5 и RCP8.5 [3].

Было выявлено, что в Актау наблюдается значительное повышение месячных и сезонных температур приземного воздуха. Наибольшая средняя скорость роста температуры происходит летом – на 0,81 °С/10 лет; весной и зимой на 0,35 и 0,34 °С/10 лет, соответственно; наименьшая скорость повышения температуры – на 0,25 °С/10 лет, наблюдается осенью. Средняя годовая температура повышается в среднем на 0,44 °С за каждые 10 лет. Что касается количества осадков, то долгосрочные тенденции в количестве осадков отсутствуют.

Для региона порта Актау для каждой ячейки широтно-долготной сетки моделей климата получены данные о вероятном изменении характеристик климата, необходимых для моделирования уровня Каспийского моря, таких как количество осадков, температура воздуха и количество испарения. Согласно мультимодельным сценариям, в соответствии с RCP4.5 и RCP8.5, количество

осадков в регионе не имеет тенденций, в то время как температура воздуха будет продолжать повышаться. Как следствие, будет также повышаться испарение с поверхности моря.

Оценка изменения уровня воды проводилась на основе выявления связей между элементами водного баланса Каспийского моря. Расчет уровня Каспийского моря на перспективу проводился на основании уравнения водного баланса. [4]. Потери воды в низовьях р. Волга и р. Жайык (Урал) являются необходимым элементом при расчёте водного баланса Каспийского моря. Поэтому в смоделированные значения притока речных вод в Каспийское море была введена поправка на потери в дельтах рек.

Уровень Каспийского моря имеет устойчивую тенденцию к снижению. Особенно четко это проявится во второй трети 21 века. В соответствии со сценарием RCP4.5 уровень Каспийского моря в районе исследования к 2055 г. может упасть до отметки минус 32,6 м БС. По более пессимистичному сценарию RCP8.5, уровень может упасть ниже отметки минус 34 м БС. [5, 6].

Таким образом, к 2055 г. уровень моря может понизиться более чем на 4 и 5 м соответственно сценариям климата. Такое понижение уровня приведет к значительному сокращению площади Каспийского моря и практически исчезновению его северной мелководной части.

Работа выполнена в рамках грантового финансирования по научным и научно-техническим проектам на 2024-2026 гг. (Министерство науки и высшего образования РК) по теме: "Моделирование влияния климатических изменений на гидрологический режим, качество вод Каспийского моря и их отражение на популяцию тюленей".

Список литературы

- 1) Vertenstein M., Hoffman F., Oleson K., Levis S. Community Land Model Version 3.0 (CLM3.0) User's Guide. 2004. [Available online at <http://www.cgd.ucar.edu/tss>].
- 2) Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление. Т. IX: Внутренние и окраинные водоемы Казахстана (Арал, Балкаш, Каспий): кн. 1: Оценка современной и прогнозной динамики гидрологического режима озера Балкаш, Каспийского и Аральского морей / Шиварёва С. П., Ли В. И., Ивкина Н. И. – Алматы. – 2012 г.– 456 с.
- 3) Шестой оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГИЭК). [<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/>].
- 4) Водный баланс и колебания уровня Каспийского моря / под редакцией Е.С. Нестерова. – М.: Триада лтд, 2016. – 378 с.
- 5) Ivkina N.I., Galayeva A.V. Assessment of fluctuations in the Caspian Sea level under the influence of climate change for the future until 2050 // Гидрометеорология и экология. – 2021. – N 1. – С. 100-107.
- 6) Akbari, Mahdi; Baubekova, Aziza ; Roozbahani, Amin ; Gafurov, Abror; Shiklomanov, Alexander; Rasouli, Kabir ; Ivkina, Natalya ; Klöve , Björn ; Torabi Haghghi, Ali, 2020 Vulnerability of the Caspian Sea Shoreline to Changes in Hydrology and Climate // Environmental Research Letters.– Volume 15.– Number 11. – 2020.

АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОИСКА РЕГРЕССИОННЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ГИДРООПТИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ПАРАМЕТРАМИ ЛИДАРНЫХ ЭХО-СИГНАЛОВ

Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Глитко О.В., Аглова Е.А., Глуховец Д.И., Родионов М.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Морской поляризационный лидар, дистанционное зондирование, внутренние волны, гидрооптические характеристики.

Важным направлением исследований с использованием морских радиометрических лидаров судового и авиационного базирования является дистанционное определение гидрооптических характеристик приповерхностного слоя. В ряде теоретических [1, 2] и экспериментальных [3, 4] работ показано, что связь между параметрами эхо-сигналов и гидрооптическими характеристиками зависит от характеристик лидара и геометрии зондирования – высоты размещения лидара над поверхностью воды, угла поля зрения приемной оптической системы и размеров площадки на поверхности воды, с которой приемная система собирает рассеянное назад излучение. Каждому конкретному лидару и его геометрии зондирования соответствуют свои соотношения между гидрооптическими характеристиками и параметрами лидарного эхо-сигнала. Установление надежных соотношений между этими величинами в широком диапазоне изменения гидрооптических характеристик является важной практической задачей. В данной работе анализируются данные лидарного зондирования и данные синхронных контактных измерений для установления регрессионных соотношений между параметрами лидарных эхо-сигналов и отдельными гидрооптическими характеристиками.

Работы выполнялись в рамках первой части 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в западной части Карского моря с 5 по 19 сентября 2022 г. Одновременно с регистрацией лидарных эхо-сигналов с использованием лидара ПЛД-1 (разработка ИО РАН [5]) производились сопутствующие измерения. На станциях в дрейфе судна измерялись вертикальные распределения показателя ослабления света морской водой на длине волны 530 нм $c(z)$ и флуоресценции хлорофилла «а» с помощью прозрачномера ПУМ-200 (разработка ИО РАН). На станциях, выполнявшихся в светлое время суток, проводились измерения вертикальных профилей спектральной облученности $E_d(z, \lambda)$, создаваемой потоком нисходящего излучения. Для проведения измерений использовался погружной гиперспектральный радиометр Ramses (Trios, Германия). Данные измерений использовались для расчета показателя диффузного ослабления нисходящего потока солнечной радиации K_d на длине волны $\lambda = 532$ нм в слое 5-10 метров. Для проведения сравнительного анализа с лидарными оценками выполнялся пересчет измеренных значений K_d для случая только направленного излучения солнца, находящегося в зените [2]. На ходу судна производились измерения с проточным комплексом ИО РАН, измеряющим показатель ослабления, температуру, соленость, флуоресценцию хлорофилла «а» и растворенного органического вещества на глубине около 2 м.

Показатель ослабления лидарного эхо-сигнала $\alpha(z)$ в соответствии с лидарным уравнением характеризует экспоненциальную форму спада лидарного эхо-сигнала [2]. В общем случае он зависит от вертикального распределения гидрооптических характеристик приповерхностного слоя. В случае однородных по глубине вод α является постоянной величиной. Для определения α использовался подход, основанный на применении аппроксимаций лидарного эхо-сигнала функцией, вид которой следует из лидарного уравнения [6]. При определении α использовался участок спада эхо-сигнала, соответствующий диапазону глубин от 4 до 8 м. Участок выше 4 м подвержен сильному влиянию поверхностного волнения. Ниже 8–10 м во многих случаях наблюдается изменчивость гидрооптических характеристик.

На станциях с однородным распределением показателя ослабления в слое от поверхности до 10 м было рассчитано среднее значение α и стандартное отклонение измеряемой величины. Полученный набор пар величин α и c , α и K_d позволил провести их статистический анализ и установить регрессионные соотношения. Линейность регрессий, связывающих эти характеристики, наблюдается при значениях показателя ослабления от $0,17 \text{ м}^{-1}$ до $1,1 \text{ м}^{-1}$ и при значениях альбеда однократного рассеяния ω_0 в диапазоне от 0,4 до 0,8. С использованием полученных регрессий на нескольких разрезах было выполнено преобразование пространственных распределений α , полученных в результате лидарной съемки вдоль маршрута судна, в пространственные распределения c . Продемонстрировано хорошее соответствие параметров полученных распределений и распределений ряда гидрооптических характеристик и солености. В дальнейшем полученные регрессионные соотношения позволят проводить систематическую лидарную съемку на ходу судна с использованием лидара ПЛД-1 для получения пространственных распределений гидрооптических характеристик.

Работа была выполнена в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2024-0028.

Список литературы

- 1) Браво-Животовский Д.М., Гордеев Л.Б., Долин Л.С., Моченев С.Б. Определение показателей поглощения и рассеяния морской воды по некоторым характеристикам светового поля искусственных источников света // Гидрофизические и гидрооптические исследования в Атлантическом и Тихом океанах. Под ред. А.С. Моница, К.С. Шифрина. М.: Наука, 1974. С. 153–158.
- 2) Gordon H.R. Interpretation of airborne oceanic lidar: effects of multiple scattering // Applied Optics. 1982. V. 21, № 16. P. 2996–3001.
- 3) Коханенко Г.П., Пеннер И.Э., Шаманаев В.С. Лидарные и in situ измерения оптических параметров поверхностных слоев воды в озере Байкал // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24, № 5. С. 377–385.
- 4) Collister B.L., Zimmerman R.C., Hill V.J. et al. Polarized lidar and ocean particles: insights from a mesoscale coccolithophore bloom // Applied Optics. 2020. V. 59, № 15. P. 4650–4662. <https://doi.org/10.1364/AO.389845>
- 5) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Экспериментальная оценка возможностей лидара ПЛД-1 по регистрации гидрооптических неоднородностей в толще морской среды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 2. С. 41–48. <https://doi.org/10.7868/S207366731702006X>
- 6) Глухов В.А., Гольдин Ю.А., Родионов М.А. Лидарный метод регистрации внутренних волн в водах с двухслойной стратификацией гидрооптических характеристик // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 3. С. 86–97. <https://doi.org/10.7868/S2073667321030084>

ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ПО ДАННЫМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕЧЕНИЙ В РЕКЕ ПРЕГОЛЕ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ БАЛТИКА)

Гмыря Е.И.^{1,2}, Чубаренко Б.В.²

¹Институт океанологии имени П.П.Ширшова РАН, Россия

²Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Россия

Ключевые слова: река Преголя, рукав Дейма, коэффициент Шези, коэффициент шероховатости.

Река Преголя - крупнейшая река Калининградской области, которая образуется слиянием рек Инструч и Анграпа. Она разделяется на два устьевых рукава - Нижнюю Преголю и Дейму в городе Гвардейске [1]. По данным [1] распределение ее общего стока между Нижней Преголей и Деймой составляет 60–40 процентов соответственно. Водосбор реки Преголи занимает около 40 процентов территории всей области [2], её воды используются в хозяйственных целях, активно обсуждаются планы по восстановлению водного транспорта, требуются простые формулы для проведения количественных оценок - поэтому в настоящий момент изучение зависимостей, связывающих морфометрические и динамические характеристики руслового потока является актуальным.

Используются разные подходы для описания зависимости между расходом реки и ее геометрическими характеристиками, одним из которых является формула Шези [3]:

$$Q = SC\sqrt{RI} \quad (1)$$

где Q – расход реки в исследуемом сечении русла, R – гидравлический радиус (отношение площади сечения к смоченному периметру), I – уклон водной поверхности, C – коэффициент Шези, S – площадь поперечного сечения. Расход воды в реке растет с увеличением геометрических характеристик русла или уклона водной поверхности.

Коэффициент Шези не является величиной постоянной, он также зависит от геометрических характеристик русла и коэффициента шероховатости. Существует множество эмпирических формул для его расчета, как например формула Р. Маннинга [3]:

$$C = R^{1/6}/n \quad (2)$$

где n - коэффициент шероховатости, определяемый по ряду специальных описательных таблиц. В данных таблицах характеристики водотоков даны очень обобщенно, что не позволяет присвоить ту или иную категорию исследуемым водотокам [4], в связи с чем было принято решение провести собственную оценку данного коэффициента.

Для проведения оценок коэффициента шероховатости для устьевых рукавов Преголи были проведены эхолотные промеры, инклинометрические измерения [5] течений (04-20.11.2022) с последующей оценкой расходов (Q), а также, по архивным данным гидропостов Росгидромета, были получены ежедневные значения уклонов Нижней Преголи и Деймы (I). Из рассмотрения убрались сроки, когда, скорости в рукавах меняли направление в течение 12 часов, за которые происходило осреднение.

Связь между расходом и уклоном искалась в виде степенной зависимости (3) аналогично тому, как эта связь описана в формуле Шези (1), где уклон водной поверхности взят в степени $\frac{1}{2}$. Расчёт нелинейного тренда в Excel показал хорошее приближение для рукава Нижняя Преголя (4) и существенно более худшее для рукава Дейма (5), что связано с большим разбросом экспериментальных данных. Попытка построить зависимость, сохраняя уклон в степени $\frac{1}{2}$, дал чуть худшие значения коэффициента детерминации для Нижней Преголи и чуть лучшие для Деймы (0.82 и 0.47 соответственно), что малозначимо.

$$Q = AI^k, Q[m^3/s], I[sm/km] \quad (3)$$

$$Q_{n.preg.} = 6.2639I^{5.41} (R^2 = 0.84); \quad (4)$$

$$Q_{deym.} = 0.5663I^{4.6854} (R^2 = 0.44). \quad (5)$$

Если сохранять подход формулы Шези (1) в части зависимости от коэффициента Шези и гидравлического радиуса, а также использовать формулу Маннинга (2), то можно провести оценку шероховатости, используя:

$$A = S * R^{1/6} / n * R^{1/2} = (R^{2/3} S) / n; n = S * R^{2/3} / A \quad (6)$$

Подставив соответствующие значения коэффициента A из (4-5) в формулу (6), а также величины гидравлического радиуса и площадей сечений, мы получили собственную оценку коэффициентов шероховатости n для Нижней Преголи и Деймы, которые равны 13 и 164 соответственно.

Если полученное значение n для Нижней Преголи по порядку величины совпадает с принятыми значениями для коэффициента шероховатости [3], то для Деймы оно слишком большое. Поэтому, предлагается не переходить к коэффициентам шероховатости и формуле Шези для оценок связи между уклоном и расходом, а напрямую пользоваться эмпирически полученными зависимостями (4-5).

Авторы благодарят Р.В.Боскачёва за возможность провести оценку уклонов водной поверхности.

Работа выполнена при поддержке темы FMWE-2024-0025 государственного задания Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Маркова Л.Л., Нечай И.Я. Гидрологический очерк устьевых областей рек Немана и Преголи //Труды ГОИН № 49. 1960. С. 118-187
- 2) Нагорнова Н.Н., Берникова Т.А. Некоторые факторы формирования короткопериодной изменчивости состояния малых аквальных экосистем (на примере Калининградской области) //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности № 1. 2010. С. 30-37
- 3) Киселёв П.Г. Справочник по гидравлическим расчётам //Москва: Энергия, 1972. С. 312
- 4) Гмыря Е.И., Чубаренко Б.В. Руслловые характеристики антропогенно трансформированного участка разделения реки Преголи на устьевые рукава //LXXVI Герценовские чтения. География: развитие науки и образования 2023. С. 22-26
- 5) Гмыря Е.И., Чубаренко Б.В., Количественная оценка величины расходов в реках Нижняя Преголя и Дейма (юго-восточная Балтика) по данным измерения придонных течений // Гидрометеорология и экология № 70. 2023. С. 38-53

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Гренкин Г.В.

Владивостокский государственный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: авторегрессия, центр действия атмосферы, индексы Каца.

Для оценки предполагаемых изменений атмосферных процессов над Дальневосточными морями используются различные показатели. Среди них можно назвать индексы циркуляции А.Л. Каца, показывающие интенсивность зонального и меридионального ветрового переноса над любым выделенным районом, а также состояние центров действия атмосферы. В настоящей работе поставлена задача определить взаимосвязь между характером развития Сибирского антициклона (местоположение, интенсивность) зимой текущего года с индексами атмосферной циркуляции над Японским морем в зимние месяцы последующего года.

Одним из методов оценки взаимосвязи между временными рядами обычно используют расчетные коэффициенты корреляции, которые не позволяют учесть непосредственно динамику временного ряда. В данной работе для моделирования динамики временного ряда $x(t)$ использовалась авторегрессионная модель (аналогичные модели рассмотрены в [1, с. 359], [2, 3]):

$$x(t+1) = ax(t) + by(t) + c.$$

Модель выражает линейную функциональную зависимость значения x в следующем году через значение x в текущем году вместе со значением другого ряда y в текущем году.

Для нахождения неизвестных числовых параметров a, b, c применяем метод наименьших квадратов. Этот метод состоит в нахождении минимума целевой функции

$$f(a, b, c) = \sum_{t=1}^{n-1} (x(t+1) - (ax(t) + by(t) + c))^2 \rightarrow \min.$$

Метрикой качества авторегрессионной модели служит коэффициент детерминации, вычисляемый по формуле

$$R^2 = 1 - \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^{n-1} (x(t+1) - (ax(t) + by(t) + c))^2}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x(t) - \bar{x})^2},$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n x(t)$. Коэффициент детерминации показывает долю дисперсии величины x , объясненной моделью. Чем выше R^2 , тем лучше модель.

Настройка параметров модели производилась для промежутков длиной в 10 лет, которые выбирались за период с 2000 по 2023 гг. Для найденных параметров рассчитывался модельный ряд, в котором значение $x(t+1)$ выражается через заданные числа $x(t)$ и $y(t)$. Затем вычислялся коэффициент детерминации, показывающий влияние ряда y на динамику ряда x . Построена таблица коэффициентов детерминации для всех возможных пар рядов. В качестве $x(t)$ и $y(t)$ выбирались следующие временные ряды: индексы зонального и меридионального переноса для Японского моря и широта, долгота и интенсивность Сибирского антициклона. Все показатели усредненные отдельно по месяцам (январь, февраль, март).

Если в качестве ряда x взять ряд интенсивности Сибирского максимума в январе, а в качестве y – ряд индекса зонального переноса над Японским морем в январе, то при сдвиге окна наблюдения получим значения коэффициента детерминации от 0.5 до 0.8. Аналогично, выбрав в качестве x ряд широты Сибирского максимума в феврале и в качестве y индекс меридионального переноса в январе, получим R^2 в таких же пределах.

Расчет индексов А.Л. Каца [4] проводился при помощи синоптических карт 10-дневного осреднения для района $30 - 50^\circ$ с.ш., $120 - 150^\circ$ в.д. (с шагом 10°), включающего в себя Японское море. Для вычисления зонального индекса (I_z) подсчитывалось число изобар, ориентированных с запада на восток и с востока на запад (с учетом циклонической или антициклональной циркуляции воздуха) и пересекающих все меридианы внутри и на границах района; меридиональный индекс (I_m) – с севера на юг и с юга на север. Положительные значения I_z и I_m характеризуют западный и южный перенос, отрицательные значения – восточный и северный соответственно. Так же при помощи декадных синоптических карт определялась локализация Сибирского антициклона – сезонного центра действия атмосферы (как статистический результат преобладания в районе барической системы одного знака), который является важным погодным и климатообразующим фактором в регионе.

Таким образом, выявлено, что интенсивность Сибирского максимума в текущем году влияет на зональный перенос над Японским морем в следующем году, а его широта – на меридиональный перенос. Например, ряд зонального индекса циркуляции в январе $x(t + 1)$ отрицательно коррелирует с рядом интенсивности Сибирского максимума $y(t)$, сдвинутым влево на год, что проявляется в авторегрессионной модели в виде отрицательного значения коэффициента b . Выбор ширины окна наблюдения в 10 лет обусловлен изменчивостью авторегрессионных коэффициентов, которая не позволяет построить удовлетворительную модель для длинных рядов.

Также реализована авторегрессионная модель, в которой динамика ряда $x(t)$ определяется двумя выбранными рядами $y(t)$ и $z(t)$, что позволяет уточнить прогноз. Для нахождения параметров модели решается система линейных алгебраических уравнений. Вычисления реализованы в пакете Octave.

Список литературы

- 1) Hamilton L.C. Statistics with STATA. Duxbury, 2006.
- 2) Каменский Д.А. Применение моделей векторной авторегрессии при прогнозировании в финансах и экономике // Фундаментальные исследования. 2019. № 5. С. 45–49.
- 3) Hanck C. et al. Introduction to econometrics with R. Режим доступа: <https://www.econometrics-with-r.org/14.5-apatadlm.html>
- 4) Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы погоды. Гидрометеиздат, 1960.

"ШТОРМ ВЕКА" 26 НОЯБРЯ 2023 Г. В ЧЕРНОМ МОРЕ: ПРОГНОЗ И ИЗМЕРЕНИЯ

Гармашов А.В., Марюшкин Ю.А., Шокуров М.В., Гуров К.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: Черное море, волны, скорость ветра, шторм

26-27 ноября 2023 г. на Черном море наблюдался один из наиболее сильных штормов за всю историю инструментальных метеонаблюдений [1]. Шторм привел к человеческим жертвам и нанес многомиллиардные убытки в южных регионах РФ.

Прошедший шторм не был неожиданностью и за несколько дней до прохождения циклона был спрогнозирован практически во всех гидрометеорологических прогнозах (в пике шторма прогнозировали порывы ветра до 40 м/с и высоты значительных волн до 10 м.). В ФГБУН ФИЦ МГИ существует модель оперативного атмосферного прогноза для Черноморского региона. Работает в оперативном режиме и дает ежедневный прогноз продолжительностью на 5 суток. В качестве граничных условий на границе домена (расчетной области) используется глобальный оперативный анализ-прогноз NCEP/NCAR GDAS. Для прогноза ветрового волнения использовалась модель ветрового волнения WAM (пространственное разрешение 10км).

В период прохождения шторма на стационарной океанографической платформе (СОП), расположенной в прибрежной зоне (600 м от берега) южного берега Крыма (пгт. Кацивели), черноморского гидрофизического полигона ФГБУН ФИЦ МГИ проводился гидрометеорологический мониторинг (высоты волн, скорость и направление ветра, температура воздуха и моря, атмосферное давление, относительная влажность), начатый в 2011 г., с помощью разработанного в МГИ комплекса сбора гидрометеорологических данных (КСГД).

Для измерения высот волн использовался витой резистивный волнограф с дискретностью опроса 4 Гц и возможностью регистрации высот волн до 10 м. В качестве измерителя ветра используется датчик ветра малогабаритный ДВМ с дискретностью опроса 5 с, высота установки датчика ветра составляла 21 м над уровнем моря. В данной работе скорость ветра приводилась к стандартной высоте 10 м по формуле, предполагающей наличие логарифмического подслоя и нейтральной стратификации.

Волновые данные прошли контроль качества с отбраковкой ненадежных фрагментов. В данной работе высота значительных волн (H_s) определялась как 4 величины среднеквадратического отклонения за период 20 мин. Максимальная высота (H_{max}) волны в волнограмме определялась как наибольшее расстояние между подошвой и гребнем. Под порывами ветра понимается скорость ветра за 5 сек., под скоростью ветра – модуль скорости ветра осредненный за 10 мин.

Цель настоящей работы состояла в представлении измеренных на СОП ветро-волновых параметров в шторме, прошедшем 26 ноября 2023 г., который считается одним из наиболее сильных за всю историю инструментальных наблюдений в Черном море.

Шторм в районе СОП начался 26 ноября 7ч 50 мин. (время UTC) с резкого усиления ветра до 15,6 м/с с порывами до 21 м/с и направлением 220^0 (ЮЗ), падением атмосферного давления до 736 мм.рт.ст. В это время высота значительных волн составляла 1.4 м, а максимальная высота волны достигала 2.3 м. В 16 ч. 50 мин. зарегистрирована наибольшая скорость ветра 31.1 м/с, порывы достигали значений 38,8 м/с, направление ветра было 242^0 (ЮЗ). В этом период наблюдалось наиболее сильное волнение: высота значительных волн составляла 3,6 м, а максимальные волны достигали высот 7.1 м.

Прошедший шторм 26 ноября 2023 г. является самым сильным за период наших инструментальных наблюдений на СОП, проводимых с 2011 г. Зарегистрированные на СОП скорости ветра

подтверждают достаточно точный гидрометеорологический прогноз, полученный по различным гидрометеорологическим моделям. Наблюдаемые высоты волн на СОП оказались ниже прогнозируемых, что можно объяснить достаточно близким расположением СОП (район СОП был прикрыт мысом) к берегу и крупной сеткой на которой предоставляется прогноз волнения.

Согласно данным прогнозов и ретроспективных анализов ядро шторма с высотами значительных волн около 9 м прошло южнее Крыма, в прибрежных районах южного берега Крыма высоты волн могли достигать 7-8м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке тем Государственного Задания FNNN-2024-0014 «Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан-атмосфера, формирующих изменчивость физического состояния морской среды на различных пространственно-временных масштабах», FNNN -2022-0002 «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO₂ в морской среде Черного и Азовского морей» и гранта № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

Список литературы

- 1) Ветро-волновые условия прибрежной зоны Азово-Черноморского региона / Евстигнеев В.П., Наумова В.А., Воскресенская Е.Н., Евстигнеев М.П., Любарец Е.П., Севастополь. 2017. 320 с.

ВЛИЯНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ НА АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ МОРСКИХ ОСАДКОВ

Дегтяр Алексей Дмитриевич

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет"

Ключевые слова: дисперсия фазовой скорости, морские осадки, газонасыщенные осадки, межгранулярное трение, коэффициент затухания, коэффициент отражения, импеданс дна.

На глубинах до нескольких десятков метров от границы водный слой - морское дно находятся неконсолидированные осадки, такие как песок, ил и различные обломочные материалы. В областях, где грунт загрязнен органикой и происходит активный рост водорослей, слой осадков становится насыщенным газом благодаря интенсивной биотурбации. Биотурбация нелигифицированных известковых осадков приводит к образованию мощных слоев биотурбитов. Биотурбация кокколитовых осадков платформенных морей задерживает их окаменение, сохраняя мягкость пещего мела. Природа газонасыщенного слоя связана с биологической активностью водорослей или метаногенных бактерий. Насыщенность служит показателем фотосинтеза или экологического баланса водоема. Образовавшиеся пузырьки имеют размеры от 0,01 до 0,1 мм и являются устойчивыми, благодаря покрывающим их пленкам.

Газонасыщение осадков значительно меняет физические и акустические характеристики среды. Затухание увеличивается, при этом скорость звука значительно снижается. Помимо этого, в пределах резонансной частоты пузырьков происходит сильная дисперсия скорости звука, а затухание увеличивается в несколько раз.

В случае трехкомпонентной (вода - f , твердая фаза - g , газ - a) среды без трения между частицами скорость звука рассчитывается по формуле Вуда. Измеряя скорость звука в дне, инвертируя формулу Вуда, можно определить содержание газа. Отметим, что мало по сравнению с остальными компонентами, плотность меняется незначительно, но сжимаемость среды резко возрастает.

Однако, неконсолидированная среда - не суспензия, присутствует внутреннее трение между частицами. Формула для скорости звука с учетом внутреннего трения (без дисперсии) изменит вид и в числителе будет $K_0 + \gamma$, где γ - модуль межгранулярной жесткости. Если примеси газа в дне нет, тогда $\gamma \ll K_0$. В присутствии газа и с ростом сатурации, величина K_0 уменьшается, и становится сопоставимой с величиной γ . Применение простой формулы Вуда дает тем более ошибочный результат, чем больше насыщение среды газом. Учет внутреннего трения в газонасыщенных осадках является принципиально важным.

Для нахождения баланса между силами внутреннего, вязкого трения и резонансными эффектами, появившимися из-за образования пузырьков, используется модифицированная теория GS+EC и GS+ED с учетом резонансных эффектов.

Рассматриваются результаты, полученные методом инверсии физических характеристик придонного водного слоя и переходного слоя дна в месте интенсивного роста водорослей. Из открытой научной литературы были взяты данные измерений биомассы водорослей, коэффициента затухания и скорости звука на трех частотах.

Делается вывод о эффективности теории GS+ED для измерения акустических характеристик среды и тем самым инвертировать физические характеристики.

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Список литературы

- 1) Комиссарова Н.Н., Фурдуев А.В. Акустический метод измерения газосодержания в донных осадках // Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 5. С. 666 – 670

- 2) Лисютин В. А. Обобщенная реологическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним трением и эффективной сжимаемостью // Морской гидрофизический журнал. 2019. Т. 35, № 1. С. 85–100.
- 3) Лисютин В.А. Ластовенко О.Р. Оценка влияния внутреннего и вязкого трения на дисперсию и затухание звука в неконсолидированных морских осадках // Акуст. журн. 2020. Т. 66, № 4. С. 420–436.
- 4) Лисютин В.А. Простая акустическая модель неконсолидированных морских осадков с внутренним и вязким трением // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2018. Т. 15, № 3. С. 39–51.

РЕЦИРКУЛЯЦИЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ПРОЛИВЕ ФРАМА

Демченко А.Ю.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2}, Будянский М.В.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург² Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, Санкт-Петербург

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток

Ключевые слова: атлантические воды, Западно-Шпицбергенское течение, пролив Фрама, Арктический бассейн, лагранжесв метод.

Пролив Фрама является одной из областей активного взаимодействия вод Арктического бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО) и вод Северо-Европейского бассейна. Атлантические воды (АВ) переносятся Западно-Шпицбергенским течением (ЗШТ) через пролив Фрама на север, а некоторое количество АВ рециркулирует в южном направлении (рециркулирующими АВ – РАВ). Согласно оценкам [1], примерно половина АВ, транспортируемая в ЗШТ, рециркулирует между 76° и 81° с.ш. Остальная часть АВ переносится ЗШТ в Арктический бассейн.

Водные массы, переносимые через пролив Фрама, вносят значительный вклад в тепловой баланс Арктического и Северо-Европейского бассейнов, влияют на глубокую конвекцию в Гренландском море. В этой работе, для исследования эйлеровых характеристик АВ и РАВ, таких как температура, расход, потоки тепла, использовался реанализ RARE1.15.2. Была исследована межгодовая изменчивость перечисленных характеристик и уровня моря за зимний сезон (декабрь-апрель). Было показано, что расходы АВ и РАВ слабо коррелируют друг с другом, что может говорить о разных механизмах, управляющих их межгодовой изменчивостью.

Для изучения кинематики вод был выбран лагранжесв метод, который позволяет отследить пути и скорость переноса вод различного происхождения и их изменчивость во времени [2]. Месячный интервал данных реанализа RARE1.15.2 не позволяет отслеживать траектории частиц, поэтому для построения лагранжесв карт использовался реанализ GLORYS12v1. Для анализа использовалась глубина 100 м, на которой возможно отследить основные пути как АВ, так и РАВ [3]. Анализ проводился для 2022 года. Ежедневно район исследования засеивался пятном маркеров с начальными условиями в узлах равномерной сетки 400x400. Для каждого маркера (узла) в обратном времени сроком на 185 суток производился численный расчет траектории, после чего все траектории проверялись на факт пересечения отрезка, соответствующего створу ЗШТ и фронтальной ветви Норвежского течения. В дальнейшем рассматривались только те маркеры, траектории которых в прошлом пересекли указанный отрезок. Затем среди отобранных траекторий выбирались только те, начальные условия которых находятся вблизи отрезка, пересекающего основные рециркулирующие ветви атлантических вод (78-80°с.ш., 4°в.д.). Был построен набор статистик, отражающих временные характеристики адвекции маркеров от створа ЗШТ до отрезка РАВ, а также от створа ЗШТ до отрезка, соответствующего входу АВ в Арктический бассейн (80.4°- 81.5°с.ш., 15°в.д.).

На графике временного интервала переноса вод, от разреза через ЗШТ до разреза РАВ, в течение модельного года, выделяется пик на 45-50 сутках. Для вод, переносимых от створа ЗШТ до разреза в Арктическом бассейне, выделяется пик на 60-65 сутках. Также были построены статистики по времени пересечения лагранжесв частицами отрезков ЗШТ и РАВ, и ЗШТ и северного отрезка. Первая статистика дает возможность выделить моменты времени, когда маркеры стартуют на отрезке разреза через ЗШТ. Был отмечен порционный приход, что может быть связано с сезонными колебаниями ЗШТ и фронтальной ветви Норвежского течения, а также существенной роли вихрей в переносе РАВ. Вторая статистика позволяет выделить сезоны активного прихода маркеров, запущенных в прошлом на разрезе через ЗШТ к разрезу РАВ и к разрезу на входе в

Арктический бассейн. Для разреза, определяющего вход в Арктику, активное поступление частиц выделяется в зимне-весенний сезон.

Было построено распределение лагранжевых частиц, достигших разрезов РАВ и разреза на входе в Арктический бассейн по координатам их запуска на отрезке ЗШТ. Выделяются два пика для графика ЗШТ-РАВ на 7-8 в.д. и 12-14 в.д., что говорит о поступлении в рециркулирующую зону как вод фронтальной ветви Норвежского течения, так и ЗШТ. Для графика ЗШТ-Арктика характерен один пик в восточной части, что говорит о преимущественном поступлении вод ЗШТ.

Список литературы

- 1) Marnela M., Rudels B., Houssais M.N., Beszczynska-Möller A., Eriksson P.B. Recirculation in the Fram Strait and transports of water in and north of the Fram Strait derived from CTD data // *Ocean Sci.*, 2013. – 9. – P. 499–519
- 2) Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu. Statistical analysis of Lagrangian transport of subtropical waters in the Japan Sea based on AVISO altimetry data // *Nonlin. Processes Geophys.*, 2017. – 24. – P. 89–99
- 3) Wang Q., Wekerle C., Danilov S., Wang X., Jung T. A 4.5 [U+202F]km resolution Arctic Ocean simulation with the global multi-resolution model FESOM 1.4 // *Geosci. Model Dev.*, 2018. – 11. – P. 1229–1255

РОЛЬ АТМОСФЕРЫ В ТЕПЛОВОМ БАЛАНСЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

Дешова Д.В.¹, Гордеева С.М.^{1,2}, Аверкиев А.С.¹

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: физика океана, тепловой баланс, Печорское море, взаимодействие с атмосферой.

В Печорском море, расположенном в юго-восточной части Баренцева моря, совокупность климатических, гидрологических и океанологических факторов создает отличную от смежного баренцевоморского бассейна обстановку [1], которая требует изучения. Одним из подходов к исследованию любого бассейна является балансовый метод [2].

В предыдущем исследовании для Печорского моря [3] были оценены водный, тепловой и солевой балансы. Установлено, что избыток тепла, поступающего в акваторию Печорского моря вследствие водообмена с соседними регионами (1,86 ТВт), почти полностью компенсируется расходом за счет взаимодействия с атмосферой. В данной работе целью явилась оценка вклада отдельных характеристик атмосферы в тепловой баланс поверхности Печорского моря.

На основе среднемесячных и среднегодовых данных реанализа ECMWF ERA5 службы Copernicus за период 1993–2018 гг. для поверхности Печорского моря (границы: по долготе 50 в.д. на западе, по широте 71 с.ш. на севере и в проливе Карские Ворота) оценены атмосферное давление, температура поверхности моря, скорость ветра и составляющие теплообмена с атмосферой. Теплообмен представляет собой сумму коротковолнового и длинноволнового излучений, скрытого и явного турбулентных потоков тепла.

В ходе выполнения работы для всего периода с 1993 по 2018 год рассматривались отдельно холодное (октябрь–март) и теплое полугодия (апрель–сентябрь). Для холодного полугодия значение атмосферного давления составило 1009 гПа. Средняя скорость ветра при этом равна 3,05 м/с, наиболее часто повторяющимся является ветер юго-западного и юго-восточного направления с повторяемостью 50 и 30 % соответственно. Температура поверхности моря $-0,26$ °С. В теплый период года атмосферное давление около нормы, 1012 гПа. Скорость ветра равна 2,20 м/с, с преобладающим северо-западным и северо-восточным ветром (повторяемость 38 и 35 %). Средняя температура поверхности моря в теплый период 2,7 °С. Таким образом, в холодный период года преобладают потоки воздуха с материка, а в теплый период с соседних акваторий. Атмосферное давление на всей акватории в основном ниже нормы.

Все рассматриваемые параметры (атмосферное давление, ТПО, скорость ветра и теплоотдача в атмосферу) на поверхности Печорского моря за период 1993–2018 гг. имеют выраженные тренды. Все составляющие теплообмена с атмосферой в оба периода года повышаются. Суммарная теплоотдача с поверхности моря в зимний период увеличивается сильнее (0,13 ТВт/год), чем в летний (0,01 ТВт/год), это сопровождается ростом атмосферного давления и скорости ветра 0,07 гПа и 0,02 м/с за год соответственно, а в летний период тренды давления и ветра отрицательны $-0,04$ гПа и $-0,02$ м/с в год. Тренды температуры поверхности моря в холодное и теплое полугодия положительны (0,06 и 0,13 °С/год), но в летний период температура растет быстрее.

Таким образом, в регионе выявлен значительный рост теплоотдачи в атмосферу с поверхности акватории, в среднем 0,07 ТВт в год, что объясняется потеплением поверхности моря, как адвективным, так и местным, так как количество солнечной радиации, приходящей на поверхность акватории, значительно увеличивается, особенно летом (0,08 ТВт за год). Это может в будущем повысить вклад атмосферы в тепловой баланс поверхности Печорского моря.

Для оценки связи теплоотдачи с поверхности моря с атмосферными параметрами построена множественная линейная регрессия с температурой поверхности моря, атмосферным давлением и скоростью ветра. Коэффициент множественной корреляции для зимнего периода составил 0,91, преобладающий вклад вносит температура поверхности моря, а суммарный вклад скорости ветра и атмосферного давления в дисперсию теплоотдачи зимой – 4 %. В летний период теплоотдача в атмосферу мало связана с атмосферными параметрами, коэффициент множественной корреляции 0,21, причем суммарный вклад давления и ветра 2 %, при этом вклад ветра в теплоотдачу с поверхности моря почти в 17 раз больше, чем вклад атмосферного давления.

-

Список литературы

- 1) Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л., Огородов С.А., Тарасов Г.А. Печорское море: прошлое, настоящее, будущее // *Океанология*. № 6. Том 47. 2007. С. 927–939.
- 2) Методы расчёта водных балансов. Международное руководство по исследованиям и практике / Под ред. А.А. Соколова и Т. Г. Чапмена. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. 117 с.
- 3) Гордеева С.М., Дешова Д.В. Водный, тепловой и солевой баланс юго-восточной части Баренцева моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 69(4). 2023. С. 407–420.

ОСОБЕННОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БЕРИНГОВА МОРЯ ОСЕНЬЮ 2023 ГОДА

Джамалова А.Г.¹, Малыгин Е.Ю.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Тихоокеанский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Владивосток

Ключевые слова: Берингово море, распределение температуры и солёности, растворённый кислород, биогенные элементы

Научно-исследовательские работы в западной части Берингова моря и тихоокеанских водах Командорских островов проводились с 23 сентября по 4 октября 2023 года. В этот период судами Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО», а именно НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО», было выполнено 68 комплексных станций, на которых, помимо гидрологической съёмки, также производился отбор проб на определение содержания в морской воде растворённого кислорода и биогенных элементов (фосфора и кремния).

Анализ гидрохимических параметров был полностью выполнен в судовой лаборатории по стандартным методикам [1]. Расчёт отклонений значений гидрологических параметров от среднеголетних был произведён по стандартной методике с использованием данных World Ocean Atlas 2018 (WOA18) – <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-atlas-2018>.

Стратификация вод Берингова моря относится к субарктической структуре. Элементами, характерными для такой стратификации, являются: верхний квазиоднородный слой (ВКС), сезонный термоклин, холодный подповерхностный слой, область главного термоклина и относительно тёплый промежуточный слой.

В ходе экспедиций было обнаружено, что температура на поверхности моря изменялась в пределах 7.5-11.1°C с максимальными значениями в области залива тихоокеанских вод, что было выше нормы в среднем на 1.0°C. В находящемся под ВКС сезонном термоклине, залегающем до глубины примерно 50 м, отмечалось резкое понижение температуры воды со средним градиентом 0.4 град./м. На этом горизонте значения параметра варьировались в диапазоне от 3 до 3.5°C, при этом в северо-восточной части преобладали отрицательные аномалии в пределах -0.5°C, а в юго-западной положительные – до 0.5°C. На горизонте 100 м температура составила 2-3.2°C, что было выше нормы, в среднем, на 0.6°C по всей области исследования. На глубине в 200 м значения менялись от 3.8 до 4.0°C, а средняя аномалия составила 0.88°C. На 500 м температура воды находилась в пределах 3.4-3.8°C с более высокими показателями в прибрежной части, что, в среднем, было на 0.1°C выше нормы. На горизонте 1000 м значения составляли порядка 2.75-2.85°C, а средняя аномалия была равна 0.07°C.

Значения поверхностной солёности практически на всей площади полигона находились в диапазоне 32.7-32.9‰. Падение показателей характеристики до 32.2‰ зафиксировано в прибрежной части в Камчатском проливе и связано с выносом распреснённых водных масс с Камчатским течением. Солёность вод открытой части акватории была меньше, в среднем, на 0.12‰, а прибрежные воды были солонее, в среднем, на 0.18‰ по сравнению с нормой. Схожий характер распределения аномалий приходится и на 50-метровый горизонт. Здесь солёность находилась преимущественно в диапазоне от 33 до 33.05‰. На горизонте 100 м воды с солёностью в пределах 33.10-33.15‰ занимали наибольшую площадь, где средняя аномалия составила -0.07‰. Распределение параметра на глубине 200 м характеризовалось сравнительной однородностью в мористой части полигона со значениями 33.6-33.9‰ и их уменьшением до 33.2‰ вблизи береговой линии. Отрицательные аномалии проявились в локациях её низких значений. От 500 до 1000 м солёность на большей части акватории, в среднем, на 0.02-0.04‰ оказалась выше климатической нормы.

В целом, пространственное распределение растворённого кислорода и его изменчивость с глубиной имеет стандартную картину. В поверхностном слое моря кислород менялся в пределах 6.4-7 мл/л, а степень насыщения кислородом не превышала 103%. На горизонте 50 м проявился подповерхностный максимум концентрации, и почти на всей акватории значения составляли 6.7-7.2 мл/л, при этом насыщение воды кислородом было ниже 100%, изменяясь в небольшом диапазоне от 88 до 98%. На 200 м наблюдалось достаточно резкое уменьшение значений концентрации растворённого кислорода – теперь на большей части акватории значения варьировались в диапазоне 1-3 мл/л, а насыщение составляло порядка 20-50%. Средняя концентрация растворённого кислорода на горизонте 1000 м составляла 0.5 мл/л при насыщении 4-8%.

Значения концентрации кремния на поверхности составляли 20-25 μM , на глубине 50 м значения фоновых концентраций кремния находились на уровне 35-45 μM . На горизонте 100 и 200 м значения изменялись в пределах 45-55 μM и 60-90 μM соответственно, при этом наиболее низкие значения отмечались около берега. На горизонте 500 м концентрация, в основном, изменялась в пределах 105-125 μM , а на глубине 1000 м концентрации кремния имели ожидаемо высокие значения и на большей части акватории изменялись в пределах 130-160 μM , причём максимум концентрации отмечался в акватории вокруг Командорских островов.

Значения концентрации фосфора в поверхностном слое изменялись в диапазоне от 0.8 до 1.8 μM , при этом самые низкие концентрации (ниже 1 μM), отмечались в самой северной точке исследуемой акватории Берингова моря. Фоновые концентрации фосфора на глубине 50 м составляли 2-2.8 μM . Значения концентрации фосфора на глубине 200 м находились, главным образом, в пределах 2.6-3.2 μM . Наименьшие концентрации биогена отмечались в северной части Карагинского залива, также локальная зона с минимальными показателями отмечалась в центре исследуемого района. В слое воды 500-1000 м фоновые концентрации фосфора изменялись в диапазоне 3-3.5 μM .

Период научных работ совпал с завершением осенних продукционных процессов, на что непосредственно указывают невысокие относительные значения растворённого кислорода и повышенные концентрации фосфора. Возможной причиной отмеченных особенностей океанологических условий является глобальное потепление, наблюдающееся в последние годы [2].

Данная работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»)

Список литературы

- 1) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана // под ред. В.В. Сапожникова. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.
- 2) IPCC, 2023: Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115.

БЕЗОТРАЖАТЕЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В СИЛЬНО НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЕ

Диденкулова Е.Г., Чугунов В.Е., Мельников И.Е.

НИУ ВШЭ (г. Нижний Новгород, Российская Федерация)

Ключевые слова: бегущие волны, волновое уравнение, радиально-симметричные волны

Исследование динамики моря – одна из основных проблем океанологии, решение которой необходимо для оценки рисков, связанных с воздействием волн на портовые и береговые сооружения, туристические зоны на побережье и хозяйственную деятельность на шельфе. Россия является морской державой, омываемой более чем десятком морей, принадлежащих бассейнам трех океанов. Наша страна ведет активную добычу углеводородов, в том числе на шельфе Дальнего Востока и Черного моря, ведет освоение прибрежной территории вдоль Северного-Морского пути, владеет обширной курортной инфраструктурой на Черноморском побережье.

Как известно, амплитуды морских волн по мере приближения к берегу увеличиваются и к берегу подходят волны большой высоты. С другой стороны, волны теряют свою энергию в результате отражений от рельефа дна, что зачастую ограничивает разрушительную силу волн. Уже отсюда возникает необходимость понимания, насколько большими бы могли быть волны на берегу, если бы отражение было минимальным. Наименьшие отражения и потери энергии, как хорошо известно, происходят на плавно меняющихся профилях дна, когда работает так называемый закон Грина. Однако было показано, что существуют пляжи специального вида с не малым уклоном, вдоль которых волна может распространяться на большие расстояния без отражения от донного склона, демонстрируя так называемое "безотражательное" распространение волн, которое приводит к аномальному накату волн на берег.

Исследование эффектов безотражательного распространения волн проводятся уже довольно давно в связи с очевидной проблемой распространения волн на большие расстояния без потери энергии. В литературе отмечены примеры существования безотражательных волн в акустике [1], в гидродинамике поверхностных волн на воде [2], в случае волн в неоднородном потоке [3], и внутренних волн в стратифицированной жидкости [4], а также волн в атмосфере Земли и Солнца [5].

Под решениями в виде бегущих волн подразумеваются решения типа $u(x-t)$, где x – пространственная координата, t – время. Если среда неоднородна или нестационарна, то уравнения содержат переменные коэффициенты, и найти строгие решения в виде бегущих волн обычно не удастся, что физически естественно связать с эффектами отражения, рассеяния и дифракции. Несмотря на это, существуют примеры безотражательных решений волновых уравнений, рассмотренных в средах со специфическими законами изменения характеристик среды. В этих случаях безотражательные эффекты в рамках линейной теории мелкой воды изучаются путем сведения волновых уравнений с переменными коэффициентами к уравнениям с постоянными коэффициентами. В работе [6] безотражательные решения получены путем сведения волнового уравнения к уравнениям типа Эйлера-Дарбу-Пуассона и Клейна-Гордона.

Данная проблема может быть рассмотрена в контексте цилиндрических волн, радиально расходящихся или сходящихся в пространстве (так же получивших название круговых волн). В таких волнах распределение всех величин, как правило, считается однородным вдоль некоторого одного направления. Примерами таких волн в гидродинамике могут служить как мелкие волны на поверхности воды от брошенного камня или колеблющегося поплавка, так и трансатлантические

волны цунами, образовавшиеся в результате падения в воду метеорита или подводного землетрясения. Акустические цилиндрические волны могут быть сгенерированы источниками, расположенными в пространстве, ограниченном двумя плоскопараллельными отражателями (в том числе внутри океанических волноводов и т.д.). При этом и бассейн (волновод), в котором распространяются волны, может быть круговой формы типа замкнутого озера или атмосферы вокруг небесного тела.

В настоящей работе найдены решения цилиндрического линейного волнового уравнения в виде бегущих волн. Безотражательные решения получены в трех случаях: в результате сведения исходного уравнения в цилиндрических координатах к волновому уравнению с постоянными коэффициентами, в результате сведения исходного уравнения к уравнению Клейна-Гордона с постоянными коэффициентами и при сведении волнового уравнения к уравнению Эйлера-Дарбу-Пуассона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01074.

Список литературы

- 1) Петухов Ю.В. О возможности безотражательного распространения плоских акустических волн в непрерывно-стратифицированных средах // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 2. С. 129–138.
- 2) Pelinovsky E., Didenkulova I., Shurgalina E., Aseeva N. Nonlinear wave dynamics in self-consistent water channels // J. Physics A. 2017. V. 50. 505501.
- 3) Churilov S.M., Stepanyants Y.A. Reflectionless wave propagation on shallow water with variable bathymetry and current // J. Fluid Mech. 2022. V. 931. A15; Pt. 2. V. 939. A15.
- 4) Pelinovsky E., Talipova T., Didenkulova I., Didenkulova (Shurgalina) E. Interfacial long traveling waves in a two-layer fluid with variable depth // Studies in Applied Mathematics. 2019. V. 142. № 4. P. 513–527.
- 5) Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Безотражательное вертикальное распространение волны в сильно неоднородной атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 2. С. 189–194.
- 6) Пелиновский Е.Н., Капцов О.В. Бегущие волны в недиспергирующих сильно неоднородных средах. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2022, том 506, № 2, с. 46–51

3D+1 ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Дидов А.А., Будянский М.В., Улейский М.Ю., Файман П.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток.

Ключевые слова: 3D+1 визуализация, физика океана, модель циркуляции вод «ROMS», апвеллинг, лагранжевы траектории.

Разработана методика визуализации, реализованная в виде пакета программ для 3D+1 графического отображения гидрологических полей по натурным и модельным данным циркуляции вод в различных бассейнах Мирового океана. Широко используемые пакеты программ, например, Surfer или готовые модули для Matlab, оказались менее эффективными из-за ограниченного набора доступных пользователю команд и малой гибкости при воспроизведении субмезомасштабных процессов. Пакет состоит из набора программ для отображения двухмерной и трехмерной информации и автоматического скачивания, обработки и конвертации данных, а также построения анимационных карт. Для отображения данных используется набор программ с открытым исходным кодом Generic Mapping Tools (GMT) [1].

Разработанный пакет программ позволяет визуализировать термодинамические (температура, соленость, плотность), лагранжевы (2-3D траектории частиц) и эйлеровы (поля скоростей, модуль скорости) характеристики. Используя натурные гидрологические разрезы, имеется возможность воспроизведения аналогичных разрезов по модельным данным. Также имеется возможность создания гидрологических разрезов по данным реанализов на основе моделей NEMO и HYCOM. Аналогичная возможность реализована для воспроизведения гидрологических профилей по данным буев Argo. Пользователь имеет возможность визуализации как в плоском, так и трехмерном виде. Отличительным качеством разработанного продукта является возможность автоматического скачивания, обработки большого массива данных и их представления пользователю в удобном для восприятия виде.

Для района вблизи устья реки Туманная в заливе Посьета на основе данных численной модели ROMS с высоким пространственным (600 м) и временным разрешением построен массив 3D полей температуры и солености. Детально рассмотрен вопрос визуализации прибрежного апвеллинга и эволюции вихря в районе бухты Сивучья [2].

В работе [3] изучается сезонный прибрежный апвеллинг на северо-западе Японского моря вблизи мыса Поворотный. Прямое наблюдение подъема холодной придонной воды на поверхность было проиллюстрировано трехмерными лагранжевыми частицами, рассчитанными на основе модельного поля скоростей численной модели ROMS с аналогичным выше представленным пространственным и временным разрешением.

Проведен анализ структуры крупного антициклона, сформированного в районе Авачинской бухты. Расчет гидрологических полей произведен на основе реанализа GLORYS12V1. Детально рассмотрен процесс деления “материнского” антициклона на два вихря.

На основе архивных данных по гидрологическим съемкам, выполненным в Японском и Охотском морях, предложен альтернативный способ визуализации данных, полученных буями Argo и с борта судна.

Работа поддержана грантом РНФ 23-17-00068 (Лагранжевы фронты и вихри в дальневосточных морях России и в прилегающей части Тихого океана и их значение для биопродуктивности и рыбного промысла; рук. Пранц С.В.).

Список литературы

- 1) Wessel P., Smith W.H.F. Free software helps map and display data // Eos, Transactions American Geophysical Union, 1991. – Т. 72. – №. 41. – С. 441–446.
- 2) Fayman P.A., Salyuk P.A., Budyansky M.V., Burenin A.V., Didov A.A., Lipinskaya N.A., Ponomarev V.I., Udalov A.A., Morgunov Y.N., Uleysky M.Yu., Shkramada S.S., Pichugin M.K. Transport of the Tumen River water to the Far Eastern Marine Reserve (Posyet Bay) based on in situ, satellite data and Lagrangian modeling using ROMS current velocity output // Marine Pollution Bulletin, 2023. – Т. 194. – С. 115414.
- 3) Fayman P.A., Budyansky M.V., Solonets I.S., Didov A.A., Sapogov I.M., Prants S.V. Simulation and Lagrangian analysis of coastal upwelling in the northwestern East/Japan Sea // Continental Shelf Research, 2024. [направлено в печать]

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЦИРКУЛЯЦИИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ СЕЗОН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГОДА НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ 2016 И 2017 ГГ.

Евстигнеева Н.А., Демьшев С.Г., Дымова О.А.

ФГБУН Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Ключевые слова: численное моделирование, ассимиляция данных наблюдений, поля течений, мезомасштабные особенности циркуляции.

Морской гидрофизический институт (МГИ) регулярно выполняет экспедиционные наблюдения в акватории Черного моря, которые пополняют базу гидрологических данных моря, выявляют и уточняют особенности изменчивости термогидрофизических полей на различных масштабах. В 2016 и 2017 гг. были проведены гидрологические съемки в летний период времени (экспедиции 87-го и 95-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий») [1, 2], что дало возможность реконструировать и проанализировать поля течений, а также сравнить полученные особенности циркуляции в зависимости от года. Целью работы являлось изучение закономерностей формирования особенностей циркуляции в северной части Черного моря в зависимости от года на основе четырехмерного анализа гидрофизических полей, восстановленных с помощью модели МГИ [3], и данных гидрологических измерений 87-го и 95-го рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (летний сезон 2016 и 2017 гг.). Для изучения полученных особенностей динамики течений рассчитывались энергетические характеристики циркуляции и анализировались вертикальные разрезы в поле плотности. Используемая численная модель динамики Черного моря, разработанная в МГИ и основанная на полных уравнениях термогидродинамики океана в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости морской воды, краевые условия на поверхности, на дне и на твердых боковых стенках подробно описаны в работе [3]. Система уравнений модели была дополнена уравнениями изменения плотности кинетической и потенциальной энергии [4], на основе которых были рассчитаны энергетические характеристики циркуляции. Для усвоения данных натуральных наблюдений использовалась процедура четырехмерного анализа, основанная на фильтре Калмана, с учетом неоднородности и неізотропности ошибок оценок полей температуры и солёности. Использовалась горизонтальная сетка $1,64 \times 1,64$ км, по вертикали 27 горизонтов. Шаг по времени выбран 96 с. Численные эксперименты были проведены с 28 июня по 18 июля 2016 г. (20 расчетных суток) и с 13 июня по 3 июля 2017 г. (20 расчетных суток) для всего Черного моря. Для подробного анализа выбрана область, расположенная между меридианами 31 и 37° в. д. и параллелями 43 и 45.5° с. ш. Данные 87-го и 95-го рейсов на НИС «Профессор Водяницкий» (температура и солёность морской воды до глубины ~1000 м на 125 и 132 дрейфовых станциях) были взяты из Банка данных МГИ. Максимальная глубина, до которой проводились зондирования, изменялась от 30 до 1900 м. Гидрологические измерения на каждой станции проводились с помощью комплекса SBE 911plus. Коэффициенты турбулентного обмена импульсом и диффузии по вертикали рассчитывались в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5. Для задания атмосферного форсинга использовались данные атмосферного реанализа ERA5 с разрешением $(1/4)^\circ$. Из анализа изменений со временем интегральных компонентов уравнения бюджета кинетической энергии показано, что в рассматриваемые летние периоды времени максимальный приток в кинетическую энергию был от ветра и только при уменьшении ветрового воздействия работа силы плавучести оказывала преобладающее влияние. Летом 2017 г. достигались более высокие значения работы силы ветра из-за усиления ветрового воздействия до максимальных значений около 17–19 м/с. Потеря энергии происходила за счет горизонтального и вертикального внутреннего трения. В периоды

проведения гидрологических съемок в летний сезон 2016 и 2017 гг. были реконструированы гидрофизические поля с пространственным разрешением $\sim 1,6$ км по горизонтали и 27 горизонтов по вертикали и проанализированы особенности циркуляции Черного моря. По результатам расчетов в 2016 г. прослеживался поток Основного черноморского течения (ОЧТ) вдоль Крымского побережья, в центральной части получен антициклонический вихрь с радиусом около 40 км, вдоль юго-восточных берегов могли генерироваться антициклонические вихри с радиусом около 25 км. В течение расчета эти вихри перемещались в том же направлении, что и ОЧТ. Вдоль западного и восточного побережий генерировались вихри разных масштабов различного знака вращения при набегании течения на неровности береговой линии и рельефа дна. По результатам расчетов в 2017 г. отмечено ослабление потока ОЧТ, проявился Севастопольский антициклонический вихрь между 31 и 32° в.д. с радиусом около 35 км и антициклонический вихрь у юго-восточных берегов Крыма с радиусом около 30 км. В восточной части области наблюдались две динамические зоны: прибрежная зона с антициклонической завихренностью течений и область циклонической завихренности в глубоководной части моря. Так как в период с 1 июля ветровое воздействие усилилось до 17–19 м/с и развивались интенсивные течения, вихревые образования в верхнем слое воды были выражены слабее. Основным механизмом формирования антициклонических вихрей вблизи г. Севастополь и у юго-восточных берегов Крыма в летний сезон в 2016 и 2017 гг. являлась бароклинная неустойчивость течения (о чем свидетельствовали увеличения наклона изопикнических поверхностей и отрицательные значения работы силы плавучести).

Расчеты гидрофизических полей на основе численной модели МГИ с усвоением данных гидрологических съемок 2016–2017 гг. выполнены в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0012 (шифр «Оперативная океанология»). Исследование энергетических характеристик и возможных физических механизмов генерации особенностей циркуляции проведено в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0001 (шифр «Океанологические процессы»).

Список литературы

- 1) Артамонов Ю. В., Скрипалева Е.А., Алексеев Д.В. и др. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 247–253.
- 2) Артамонов Ю.В., Федирко А.В., Скрипалева Е.А. и др. Структура вод в зоне Основного Черноморского течения весной и летом 2017 г. (94-й, 95-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий») // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2019, № 1. С. 16–28.
- 3) Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48, № 1. С. 37–149.
- 4) Демьшев С.Г. Энергетика климатической циркуляции Черного моря. Ч.1. Дискретные уравнения скорости изменения кинетической и потенциальной энергий // Метеорология и гидрология. 2004. № 9. С. 65–80.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЯ КРОМКИ ДРЕЙФУЮЩИХ ЛЬДОВ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ НА МОМЕНТ ИХ МАКСИМАЛЬНОГО НАРАСТАНИЯ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Егорова Е.С., Миронов Е.У.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Баренцево море, ледяной покров, дрейфующий лед, положение кромки, ледовитость, типовые особенности, кластерный анализ, классификация

Важную информацию о ледовых условиях Баренцева моря, необходимую как для понимания изменчивости климатической системы, так и для практики гидрометеорологического обслуживания, дает кромка дрейфующих льдов на его акватории и ледовитость. Как показано в [1], эти характеристики ледяного покрова тесно связаны друг с другом (коэффициент корреляции составляет порядка 0,7-0,9). В работе [2] были систематизированы закономерности сезонных изменений пространственного распределения морских льдов в Баренцевом море, наблюдаемые в период 1934–1991 гг.

В настоящей работе был произведен совместный анализ пространственного положения ледяного покрова Баренцева моря, для чего был задействован инструмент кластерного анализа положения кромки дрейфующих льдов и ледовитости. Авторами было использовано два метода кластерного анализа, а именно метод Уорда (в качестве критерия близости была выбрана евклидова метрика) и метод k-средних — они являются наиболее распространенными в задаче определения типовых распределений ледовых характеристик [3-4]. Классификация была произведена для апреля, месяца максимального нарастания ледяного покрова на исследуемой акватории, который представляет наибольший интерес как для научных, так и для практических целей. В результате как для ледовитости, так и для положения кромки дрейфующих льдов было выделено три больших кластера, описывающих тяжелые, средние и легкие ледовые условия в Баренцевом море в апреле.

Непрерывные данные по ледовитости и положению кромки льдов для апреля представлены для периода 1953–2023 гг. Данные по положению кромки были получены лично авторами в результате совместного анализа региональных ледовых карт Баренцева моря на бумажных носителях из фондов Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) за период 1953–1996 гг., а также из электронного каталога Мирового центра данных по морскому льду АНИИ за период 1997–2023 гг. [5].

При сравнении результатов кластерного анализа по двум методам было определено, что ледовые условия в 1964, 1986 и 1992 гг. (положение кромки дрейфующих льдов) и в 1959, 1986 и 1992 гг. (ледовитость) относятся к разным кластерам. Эти несоответствия могут быть объяснены методическими принципами проведения процедуры кластерного анализа.

Однако наибольший интерес представляют различия в классификации ледовых условий Баренцева моря при определении типовых распределений характеристик ледяного покрова по отдельности. Согласно классификации по методу Уорда, ледовые условия по ледовитости оказались легче, чем по положению кромки в 1962 г. и 1981 г., и наоборот, тяжелее — в 1953–1955, 1964–1965, 1973, 1975, 1978 и 1985 гг. Напротив, согласно классификации по методу k-средних, ледовые условия по ледовитости оказались легче, чем по положению кромки в 1962 г., 1981 г. и 2000 г., и наоборот, тяжелее — в 1953–1955, 1959, 1965, 1973, 1978, 1985 и 1992 гг. Таким образом, по методу Уорда из 70 рассматриваемых лет в 12 наблюдаются различия в определении кластера ледовых условий, по методу k-средних — в 11, причем годы совпадают лишь частично. Эти несоответствия, наряду с различиями в методических принципах проведения процедуры кластерного анализа, могут быть

объяснены ошибками в ледовых картах и субъективностью их анализа, особенно в случаях наличия облачности над акваторией Баренцева моря. В целом выделенные кластеры ледовых условий по ледовитости и по положению кромки дрейфующих льдов соответствуют друг другу.

Авторы склонны предполагать, что классификация по методу Уорда относительно более достоверно определяет кластеры ледовых условий. Для лет, где выявлено несовпадение классификации (до 1985 г. по методу Уорда), еще не характерна унификация сбора и обработки ледовой информации: среднемесячные данные по ледовитости и положению кромки могли быть определены по ледовым картам из различных доступных источников и за разные декады внутри одного месяца. В это же время 1992 г. и 2000 г., для которых было выявлено несовпадение в классификации по методу k-средних, относятся к годам, когда получаемая ледовая информация была относительно более достоверной и единообразной.

Максимальное количественное расхождение в значениях координат положения кромки между кластерами, выделенными по двум методам, составляет $\pm 0,9^\circ$ долготы — оно отмечается в кластерах тяжелых (на створе 73° с.ш.) и средних (на створе 75° с.ш.) ледовых условиях в пользу метода k-средних. Координаты положения кромки в кластере легких ледовых условий различаются не более чем на $\pm 0,2^\circ$ долготы (на створе 70° с.ш.) в пользу метода Уорда. Следует отметить, что при типизации ледовых условий обоими методами широтное положение границы распространения ледяного покрова для всех кластеров совпадает. Для ледовитости количественное расхождение в ее значениях не превышает 1% (для кластера тяжелых ледовых условий в пользу метода Уорда, легких ледовых условий — метода k-средних). Полученные типизации ледовитости и положения кромки дрейфующих льдов могут быть использованы для прогноза типа ледовых условий в Баренцевом море в период максимальной площади ледяного покрова на его акватории.

Работа выполнена в рамках НИТР НИУ Росгидромета на 2021–2024 гг. по теме 5.1.2 "Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений".

Список литературы

- 1) Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том I. Баренцево море, Выпуск 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Ф. С. Терзиева, Г. В. Гирдюка, Г. Г. Зыковой, С. Л. Дженюка. — Ленинград: Гидрометеоиздат, 1990 — 281 с.
- 2) Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз / под ред. В.А. Спичкина. — СПб.: ААНИИ, 2004. — 319 с.
- 3) Тимохов Л.А. Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Попов А.В. Особенности сезонной и межгодовой изменчивости ледяного покрова Гренландского моря // Лед и Снег. — 2018. — Т. 58. — №1. — С. 127-134.
- 4) Тимохов Л.А. Вязигина Н.А., Миронов Е.У., Юлин А.В. Климатические изменения сезонных и долгопериодных колебаний ледовитости Гренландского и Баренцева морей // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2019. — Т. 65. — №2. — С. 148-168.
- 5) Архив Мирового центра данных по морскому льду. [Электронный ресурс]. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004/> (Дата обращения: 04.12.2023)

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СХЕМЫ С КОРРЕКЦИЕЙ ПОТОКОВ ДЛЯ ПЕРЕНОСА ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОГО ЛЬДА В МОДЕЛИ INMOCEAN

Ежкова А.А.^{1,2}, Оноприенко В.А.¹, Благодатских Д.В.¹, Яковлев Н.Г.^{1,2}

¹Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: Арктика, физика океана, морской лёд, схемы переноса, CORE II

Для успешного численного моделирования динамики льда важно правильно выбрать подходящую разностную схему переноса ледовых характеристик. Она должна допускать решения, содержащие большие значения градиентов характерные для наблюдаемых в природе распределений сплоченности и толщины льда, поскольку они позволяют более точно воспроизводить его кромку. Схемы первого порядка сильно сглаживают поля, в то время как схемы высокого порядка, хоть и являются более точными, допускают появления отрицательных значений в полях распределений массы и сплоченности. Чтобы разрешить эту проблему, обычно используются схемы более высокого порядка с ограничителями потоков или корректировками, сохраняющие монотонность схемы или хотя бы её положительность. В данный момент в климатической модели ИВМ РАН для переноса льда используется схема первого порядка против потока (upwind). Целью работы было подобрать более точную схему, при этом сохраняющую положительность при переносе полей.

Перенос массы и сплоченности льда описывается следующими уравнениями:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \nabla x(u\varphi) + \nabla y(v\varphi) = 0,$$

где x, y - произвольные ортогональные координаты, u, v - компоненты вектора, скорости потока, а под φ подразумевается масса льда или его сплоченность.

Изначально исследовались схемы переноса характеристик морского льда в дивергентном и бездивергентном полях скорости для конечно-разностной модели динамики океана и морского льда на основании пакета программных средств для расчёта гидродинамики, разработанного в НИВЦ МГУ на языке C++. Схемы переноса реализовывались в двумерной области на сфере. Использовались как гладкие, так и разрывные распределения плотности поля массы и сплоченности в начальный момент времени. Рассматривались следующие схемы для переноса характеристик: против потока, центральные разности второго порядка в адвективной форме и схема с коррекцией потоков [1].

Результаты исследования показали, что среди рассмотренных схем наиболее точной оказалась схема с коррекцией потоков, одновременно являясь вычислительно наиболее дорогостоящей. Поскольку поля массы и сплоченности рассчитываются независимо, могут возникать нереалистично большие значения толщины, вычисляющейся как отношение массы на сплоченность в случае, если для ограниченной массы сплоченность стремится к нулю. Подобные решения являются нефизичными. Поля распределений массы и сплоченности льда, получаемые с помощью схемы с коррекцией потоков, сохраняют свою форму и не содержат отрицательных значений. При этом число точек, в которых значения можно считать нефизичными, при использовании этой схемы меньше (2.9%), чем при использовании схемы против потока (5.9%).

Для данного набора схем было проведено тестирование производительности на одном A100 GPU, одном Intel Xeon Gold 6240 CPU-ядре и одном CPU-узле при выполнении расчета переноса с

применением различных схем и при различном горизонтальном разрешении для двумерной модели [2]. Схема переноса с коррекцией потоков показала наибольшее ускорение в случае уменьшения горизонтального разрешения.

По итогам исследования было решено реализовать возможность расчета переноса ледовых характеристик с помощью схемы с коррекцией потоков в соответствии с единым стандартом, принятым для перспективной модели океана и морского льда INMocan, являющейся частью модели Земной системы ИВМ РАН.

В рамках полной модели циркуляции Мирового океана и морского льда с разрешением 0.5×0.25 градуса были проведены расчёты в соответствии с протоколом CORE-II [3] (6 циклов по 60 лет с заданным атмосферным форсингом 1948-2008 гг.)

Полученные результаты сравнивались со спутниковыми данными, данными статьи [4] и результатами текущей версии климатической модели INMCM6.0. Для анализа были выбраны сентябрь 2007 г. для поля сплоченности и среднее значение для весны (февраль, март, апрель) 2004-2007 гг. для поля толщины льда. Спутниковые данные для соответствующих периодов: NSIDC [5] по сплоченности и ICESat [6] по толщине льда. При использовании схемы с коррекцией потоков воспроизведение характеристик приблизилось к наблюдаемым со спутника.

Полученные результаты показали перспективность использования реализованной схемы переноса при выполнении климатических расчетов. Предполагается дальнейшее исследование возможности использования в схеме с коррекцией потока схем более высокого порядка.

Данная работа была выполнена при поддержке молодежной лаборатории ИВМ РАН “Суперкомпьютерные технологии математического моделирования Земной системы”.

Список литературы

- 1) Zalesak, S. T. Fully multidimensional flux-corrected transport algorithms for fluids. 1979. Journal of computational physics, 31(3):335–362.
- 2) Gaschuk, E.M., Ezhkova, A.A., Onoprienko, V.A. et al. Passive Tracer Transport in Ocean Modeling: Implementation on GPUs, Efficiency and Optimizations. 2023. Lobachevskii J Math 44, 3040–3058 <https://doi.org/10.1134/S1995080223080152>
- 3) S. M. Griffies, A. Biastoch, C. Boning, et al., Coordinated Ocean–Ice Reference Experiments (COREs), Ocean Model. 2009. 26 (1–2), 1–46. doi 10.1016/j.ocemod.2008.08.007
- 4) Qiang Wang, Mehmet Ilicak, Rüdiger Gerdes, et al., An assessment of the Arctic Ocean in a suite of interannual CORE-II simulations. Part I: Sea ice and solid freshwater. 2016. Ocean Modelling. Volume 99, pages 110-132.
- 5) Fetterer, F., Knowles, K., Meier, W., M., S., 2002. Sea Ice Index. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media. Updated daily.
- 6) Kwok R., Cunningham G.F., Wensnahan M., Rigor I., Zwally H.J., Yi D. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. 2009. J. Geophys. Res. Oceans, 114

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОДВОДНОГО ХРЕБТА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО БЕТА-ЭФФЕКТА

Елкин Д.Н.^{1,2}, Зацепин А.Г.^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия, dmelkin@mail.ru

Ключевые слова: вращающаяся жидкость, наклонное дно, топографический бета-эффект, баротропные и бароклинные вихри, «западный» дрейф, влияние хребта

При наблюдениях за эволюцией «Севастопольского» антициклонического вихря в Черном море, перемещающимся вдоль изобат над континентальным склоном в юго-западном направлении было обнаружено, что движение вихря замедляется в области подводного хребта, образованного локальным поднятием батиметрии между двумя каньонами – палеоруслом Дуная и палеоруслом Западного Днестра. В связи с этим была поставлена задача лабораторного экспериментального исследования влияния подводного хребта расположенного на наклонном дне и направленного вдоль склона на антициклонические вихри, перемещающиеся вдоль изобат за счет топографического бета-эффекта [1, 2].

Эксперимент производился в цилиндрическом бассейне сделанном из оргстекла и размещенном в центре вращающейся против часовой стрелки, платформе, в который был вставлен вписанный конус вершиной вверх. Угол между образующей конуса и горизонталью составлял 15°. Бассейн заполнялся однородной по плотности водой, пресной, или с определенной соленостью, не более 4 ‰. Уровень слоя жидкости в бассейне был таков, что вершина конуса находилась под поверхностью воды. Антициклонические вихри создавались с помощью локального источника постоянного расхода воды той же плотности (солености), что в бассейне - баротропные вихри, или, меньшей плотности (солености) - бароклинные вихри. Этот источник представлял собой вертикальную трубку, конец которой располагался на поверхности водного слоя на расстоянии половины радиуса бассейна от его центра. Он снабжался водой из закрепленной на стойке платформы объемной бюретки, заполненной пресной водой, подкрашенной красителем в ярко синий цвет. Половина опытов проводилась над гладким конусом, а другая половина - при наличии хребта, закрепленного на поверхности конуса вдоль его образующей. Хребет представлял собой правильную треугольную призму. Он располагался на расстоянии от источника, приблизительно равном радиусу бассейна в антициклоническом направлении и его высота по отношению к общей глубине слоя воды в области распространения вихрей составляла 0.1-0.2. Таким образом, хребет представлял собой небольшое препятствие, приблизительно подобное своему черноморскому аналогу. Для видеозаписи эксперимента сверху, на платформе располагалась верхняя видеокамера, а для видеозаписи сбоку - боковая видеокамера.

Когда вода в бассейне раскручивалась до состояния твердотельного вращения, включались видеокамеры, и источник, через который пресная вода с квазипостоянным расходом поступала на поверхность воды. Вследствие этого под источником образовывались антициклонические вихри, которые в баротропном случае достигали дна, а в бароклинном заканчивались на некоторой глубине, образуя антициклоническую приповерхностную плотностную линзу. В этом случае, из-за закона сохранения потенциального вихря, под линзой формировалась антициклоническая вихревая колонка, достигавшая дна. Вследствие топографического бета-эффекта баротропные и

бароклинные вихри, образующиеся под источником перемещались над конусом в «западном» - антициклоническом направлении. По поверхности водного слоя рассыпались мелкие бумажные пелетки, видеосъемка которых позволяла определить скорость орбитального вращения воды в вихрях.

После каждого опыта, на основе обработки данных видеосъемки, определялись следующие параметры вихревого течения: трансляционная скорость распространения вихрей от источника в антициклоническом направлении; максимальная орбитальная скорость вращения воды в вихрях; радиус вихрей (по расстоянию от центра вихря до орбиты максимальной скорости) и выявлялось влияние хребта на параметры вихревого течения.

В экспериментах с хребтом, хребет сильно замедляет распространение вихревого течения и способствует ослаблению индивидуальных вихрей. Расчеты показали, что при пересечении хребта азимутальная скорость вихревого течения уменьшается в два раза и более. Наиболее сильное замедление течения происходит в случае баротропных вихревых колонок. Плотностная стратификация несколько ослабляет действие топографического бета-эффекта, но не подавляет его полностью. Хребет уменьшает глубину проникновения бароклинного вихревого течения и уменьшает величину орбитальной скорости вихрей.

Когда антициклонический вихрь подходит вплотную к хребту, стремясь переместиться вдоль изобаты, заползая на хребет, антициклонический вихрь смещается вниз по склону. При этом выше него образуется циклонический вихрь меньшего диаметра. Данная вихревая пара имеет тенденцию к перемещению в циклоническом направлении, поэтому перемещение антициклона в антициклоническом направлении замедляется. Поскольку антициклон является более крупным и мощным вихрем, по сравнению с циклоном, он «прокручивает» последний вокруг себя. В конце концов, оба вихря пересекают хребет. Вскоре после этого циклон диссипирует, а антициклон в ослабленном виде продолжает перемещаться в антициклоническом направлении за счет топографического бета-эффекта.

В целом, результаты эксперимента подтвердили натурные наблюдения, а также результаты численного моделирования [3] свидетельствующие о влиянии вдольсклонового подводного хребта, расположенного в западной части Черного моря на процесс распространения и орбитальную скорость «Севастопольского» антициклонического вихря.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № FMWE-2024-0016, при финансовой поддержке гранта РФФИ № 21-77-10052

Список литературы

- 1) Зацепин А.Г., Дидковский В.Л. Об одном механизме формирования мезомасштабных вихревых структур в склоновой зоне океана. – ДАН, 1996. Т.347. N1. С.109-112.
- 2) Зацепин А.Г., Дидковский В.Л., Семенов А.В. Автоколебательный механизм формирования периодической вихревой структуры от стационарного локального источника на наклонном дне во вращающейся жидкости. - Океанология. 1998. Т.37. N1.
- 3) Kubryakov A.A., Mizyuk A.I., Stanichny S.V. Stationarity and separation of the Sevastopol eddies in the Black Sea: the role of eddy-topographic interaction and submesoscale dynamics // Journal of Marine Systems, 2023, V. 241, 103911.

ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ДОПЛЕРОВСКОЙ МОРСКОЙ СВЧ РАДИОЛОКАЦИИ

Ермошкин А.В.

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»*

Ключевые слова: когерентная радиолокация, морская поверхность, эффект Доплера, радиоволны, радиолокационное зондирование, динамические процессы

Работа посвящена обсуждению возможностей и ограничений использования когерентных радиолокаторов СВЧ диапазона для решения океанологических задач, к которым можно отнести не только определение характеристик ветрового волнения и зыби, определение скорости приповерхностного течения, в том числе неоднородного, но и диагностику различных динамических процессов, проявляющихся на морской поверхности.

Идея использования радиолокационных средств, работающих в СВЧ диапазоне, для морских исследований насчитывает более 50 лет [1]. Возникновение терминов «радиоокеанография», «космическая геофизика», «доплеровская океанография» связано с бурным развитием данной идеи в 70-80х годах XX века [2], чему способствовали запуски искусственных спутников Земли (ИСЗ) «Космос -1500», Seasat и многих других. С того времени не возникает сомнений в возможностях морской СВЧ радиолокации при решении океанологических задач.

Для решения определенной задачи формируются требования к радиолокационной аппаратуре, но понятно, что всегда ищется компромисс между техническими возможностями аппаратуры и её стоимостью. Для решения широкого класса задач желательно чтобы радиолокационная система производила периодический обзор достаточно большой области морской поверхности с высоким пространственно-временным разрешением. Для ИСЗ это возможно только при увеличении числа космических аппаратов, что крайне затратно, но в перспективе будет реализовываться в виде многоспутниковой группировки. С другой стороны, можно проводить периодическую радиолокационную съемку высокого разрешения с помощью радиолокатора кругового обзора, установленного на судне, морской платформе, береговом посту. Безусловно, зона обзора такого радиолокатора мала в сравнении с радиолокаторами с синтезированной апертурой на ИСЗ. Но для решения определенного круга океанологических задач такой инструмент может быть очень полезным а, в некоторых случаях, не иметь альтернативы.

В настоящей работе проведено объединение возможностей когерентной радиолокационной станции СВЧ диапазона, работающей в круговом обзоре, описанных в предыдущих работах, для решения следующих океанологических задач: определение характеристик ветрового волнения и зыби, оценка приповерхностного течения, определение параметров внутренних волн, построение карт ледовой обстановки, обнаружение пленочных загрязнений, диагностика газовых сипов, фронтальных разделов, вихрей [3-6]. Для решения каждого типа задач предложена своя методика проведения измерений и определены её ограничения. Следует отметить, что получаемые когерентным радиолокатором результаты не нуждаются в дополнительной калибровке, в отличие от данных некогерентного радиолокатора. Также не исключается применение известных алгоритмов, полученных другими авторами для некогерентного зондирования к представленным данным.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10081, <https://rscf.ru/project/20-77-10081/>.

Список литературы

- 1) Жидко Ю.М., Калмыков А.И., Каневский М.Б., Пичугин А.П., Цымбал В.Н. Радиолокационное зондирование океана. В сб. Дистанционные методы исследования океана: ИПФ АН СССР, 1987. С. 5-33.
- 2) Розенберг А.Д. Исследование морской поверхности радио и акустическими методами. Диссертация на соискание ученой степени д.ф.-м.н. (специальность 11.00.08). ИО им П.П. Ширшова АН СССР, Москва, 1980. 237 с.
- 3) Ermoshkin A., Kapustin I. Estimation of the wind-driven wave spectrum using a high spatial resolution coherent radar // Russ. J. Earth Sci. 2019. V. 19, №3. P. 1.
- 4) Ermoshkin A, Shomina O, Molkov A, Bogatov N, Salin M, Kapustin I. Manifestation of Internal Waves in the Structure of an Artificial Slick Band // Remote Sensing. 2024. V. 16, №1. P. 156.
- 5) Ermoshkin A.V, Molkov A.A. High-Resolution Radar Sensing Sea Surface States During AMK-82 Cruise // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2022. V. 15. pp. 2660–2666.
- 6) Ermoshkin A.V, Kapustin I.A., Molkov A.A., Semiletov I.P. Manifestation of Gas Seepage from Bottom Sediments on the Sea Surface: Theoretical Model and Experimental Observations // Remote Sensing. 2024. V. 16, №2. P. 408.

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДОВЫХ ТРЕЩИН В ЧУКОТСКОМ МОРЕ ПО МУЛЬТИСЕНСОРНЫМ ДАННЫМ

Жук В.Р., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: физика океана, морской лед, Чукотское море, взаимодействие океан-атмосфера

Вынос льда из Арктики через Берингов пролив играет важную роль в потоках тепла и формирования термохалинной структуры региона [1-2]. Интенсивный перенос льда происходит при взломе устоявшегося ледового поля с образованием трещин параболической формы [3]. Такие трещины, протяженностью сотен тысяч км, могут распространяться по всей акватории Чукотского моря, оказывая значительное влияние на ледовую динамику. В настоящей работе рассматриваются особенности движения льда на юг и его связь с ветровым воздействием на основе спутниковых данных температуры, оптических наблюдений, *in situ* ADCP измерений и данных реанализов GLORYS12v1 и ERA5.

По оптическим данным, а также по измерениям температуры поверхности льда отчетливо наблюдаются несколько событий ледового выноса из акватории Чукотского моря на юг в 2012 году: 26 февраля – 2 марта и 15-20 марта. В обоих случаях происходило разрушение «ледовой арки» в области Берингова пролива и образование трещин параболической формы, которые выделялись среди прочих сломов льда. Линейные размеры трещин находились в диапазоне от 71.77 до 346.04 км и от 64.32 до 191.54 км во время выносов в феврале и марте соответственно. Сопоставление моделирования форм ледовых трещин со спутниковыми данными показало хорошее соответствие параметров расположения и протяженности. Проведена оценка свободной ото льда площади. За счет образования трещин площадь открытой воды с 14 по 17 марта увеличилась в 3 раза и составляла до 5000 км². Анализ данных заякоренных измерителей ADCP и ветра показал сильную связь с коэффициентом корреляции 0.83. При этом северный ветер достигал 10 м/с, что наблюдалось одновременно с усилением южных скоростей в Беринговом проливе.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FNNN-2024-0017 (анализ контактных измерений) и № FNNN-2024-0012 (анализ трансформации ледового поля).

Список литературы

- 1) Babb D. G., Galley R. G., Asplin M. G., Lukovich J. V., and D. G. Barber Multiyear sea ice export through the Bering Strait during winter 2011–2012 // *J. Geophys. Res. Oceans*. V. 118. 2013. Pp. 5489–5503. doi:10.1002/jgrc.20383.
- 2) Moore G.W.K., Howell S.E.L., Brady, M. et al. Anomalous collapses of Nares Strait ice arches leads to enhanced export of Arctic sea ice. // *Nat Commun*. V.12 (1). 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20314-w>
- 3) Sodhi, D.S.1977 Ice arching and the drift of pack ice through restricted channels. CRREL Rep. 77–18.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ЕВРАЗИЙСКОМ БАССЕЙНЕ АРКТИКИ И ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ НА ОСНОВЕ STD-ДАННЫХ (ПРОГРАММА NABOS, РАЗРЕЗ «POLARSTERN-96»)

Журбас Н.В., Лыжков Д.А., Кузьмина Н.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: ветви Атлантической воды, T,S-ансамбли, кластеры, средние T,S-характеристики водных масс, перемешивание

Представленное исследование проводилось в трех направлениях. Первая часть работы была посвящена анализу термохалинных характеристик Атлантических вод (АВ) в желобе Святой Анны на основании 4-х разрезов: полученных в разные годы в рамках программы NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System) за период 2002–2015 гг и разреза «Polarstern-96». Было кратко описано интрузионное расслоение различного масштаба. Структура интрузий в желобе Святой Анны сравнивалась с интрузионным расслоением, типичным для Евразийского бассейна [1, 2].

Особое внимание уделялось описанию особенностей T , S -индексов Баренцевой ветви АВ (БВАВ). Описание T , S -индексов БВАВ проводилось с ориентацией на работу [3], в которой выделены две водные массы БВАВ: промежуточная пресная и холодная водная масса, лежащая ниже водной массы Фрамовской ветви АВ (ФВАВ), и теплая, соленая, плотная водная масса (так называемая, истинная мода БВАВ).

Дополнительно рассчитывались средние характеристики различных водных масс в желобе Святой Анны. Для расчетов применялся наиболее популярный метод кластеризации, а именно метод k -средних. Определения кластеров проводились для рядов потенциальной температуры, θ ($^{\circ}\text{C}$), солёности, S (psu), потенциальной плотности, σ ($\text{кг}/\text{м}^3$). Потенциальная температура и потенциальная плотность рассчитывались от нулевого горизонта. STD-значения температуры, солёности, потенциальной плотности, для которых определялись кластеры, сводились к безразмерным значениям благодаря нормировке: $\theta' = \theta / (1^{\circ}\text{C})$, $S' = S / (1 \text{ psu})$, $\sigma' = \sigma / (1 \text{ кг}/\text{м}^3)$ (более подробно метод кластеризации представлен в работе [4]).

Во второй части работы было проведено сравнение термохалинных характеристик АВ в желобе Святой Анны и разных районах Евразийского бассейна на основе STD-данных, полученных в различные годы. Сравнение проводилось на основе более полного объема данных по сравнению с работой [5]. Особое внимание уделялось трансформации θ , S -индексов БВАВ на пути от района вблизи 103° в. д. к району 126° в. д. Показано, что сигнал БВАВ, характеризующийся конкретным рисунком на θ , S -диаграммах, удовлетворительно регистрируется и в районе вблизи 103° в. д., в то время как в районе 126° в. д. этот сигнал сглажен или отсутствует. Дополнительно сравнивались средние значения температуры, солёности и плотности различных водных масс в разных районах Евразийского бассейна, оцененные на основе кластерного метода. На основе сравнения, в частности, получено, что в годы потепления (2006–2009 гг) вдоль 126° в. д. средняя потенциальная плотность АВ значительно уменьшилась. Такое уменьшение средней плотности АВ может свидетельствовать о том, что в годы потепления в зоне вблизи 126° в. д. центральная часть объема АВ была расположена ближе к поверхности океана по сравнению с 2003–2005 гг и 2013, 2015 гг. Такой феномен мог явиться причиной увеличения потока тепла от АВ к поверхности и интенсификации таяния льда.

Заключительная третья часть работы посвящена обсуждению процессов обмена и перемешивания различных водных масс АВ.

Работа поддерживалась бюджетным финансированием Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема FMWE-2024-0015).

Список литературы

- 1) Rudels B., Björk G., Muench R. D. et al. Double-diffusive layering in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Journal of Marine Systems*. 1999. № 21(1–4). P. 3–27. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(99\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(99)00003-2).
- 2) Kuzmina N., Rudels B., Zhurbas V. et al. On the structure and dynamical features of intrusive layering in the Eurasian Basin in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2011. № 116(C00D11). <https://doi.org/10.1029/2010JC006920>.
- 3) Dmitrenko I.A., Rudels B., Kirillov S.A. et al. Atlantic Water flow into the Arctic Ocean through the St. Anna Trough in the northern Kara Sea // *J. Geophys. Res.: Oceans*. 2015. № 120(7). P. 5158–5178. <https://doi.org/10.1002/2015JC010804>.
- 4) Лыжков Д.А., Журбас Н.В., Кузьмина Н.П. О кластеризации термохалинных характеристик Атлантической воды в Арктическом бассейне (CTD-данные NABOS) // *Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года*. Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023. С. 114–115. ISBN 978-5-4386-2269-7.
- 5) Zhurbas N., Kuzmina N. Variability of the thermohaline structure and transport of Atlantic water in the Arctic Ocean based on NABOS (Nansen and Amundsen Basins Observing System) hydrography data // *Ocean Sci*. 2020. № 16. P. 405–421. <https://doi.org/10.5194/os-16-405-2020>.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ВЕТВИ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОДНЫХ МАСС В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ

Забудкина З.В.¹, Осадчиев А.А.^{1,2}, Фрей Д.И.²

¹Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: атлантические водные массы, желоб Святой Анны, термохалинная структура.

Крупномасштабный перенос атлантических водных масс из Северной Атлантики в Северный Ледовитый океан является одним из наиболее важных факторов, определяющих термохалинную структуру и циркуляцию в Арктике. Теплые и соленые атлантические водные массы достигают арктического бассейна двумя путями — через пролив Фрама и Баренцево море. Южная ветвь атлантических водных масс, так называемая баренцевоморская водная масса (БВМ), охлаждается в Баренцевом море в результате зимней конвекции, опускаясь за счет этого на глубину, и далее распространяется на север к континентальному склону вдоль восточного склона желоба Святой Анны (ЖСА) [1]. Однако вопрос о межгодовой изменчивости термохалинных характеристик БВМ, причинах этой изменчивости и влиянии ее на дальнейшее распространение БВМ в сторону континентального склона остается не до конца изученным. Это связано с недостаточным количеством натуральных измерений в данном регионе из-за сложных погодных условий в холодный период года и, во-вторых, с происходящими в настоящий момент интенсивными климатическими изменениями в Арктике, которые непосредственно влияют на термохалинные характеристики БВМ. В данной работе на основе натуральных данных, собранных в ходе многочисленных экспедиций с 1991 по 2023 год, проводится анализ межгодовой изменчивости характеристик БВМ и высказываются предположения о причинах этих изменений и факторах, влияющих на трансформацию БВМ в ходе ее продвижения к континентальному склону.

Анализ натуральных измерений, полученных в ходе 24 экспедиций с 1991-го по 2023-ий год, выявил наличие значительной межгодовой изменчивости термохалинных характеристик БВМ в восточной части Баренцева моря и желобе Святой Анны. Если в девяностые годы БВМ на входе в желоб Святой Анны была стабильно холодной (-0.8°C — -1°C), то в последние десятилетия наблюдается большой разброс температур до $1,5^{\circ}\text{C}$. Сравнение натуральных данных на западной границе Баренцева моря и на входе в ЖСА показал наличие корреляции значений температуры и солёности в последние 20 лет, однако также возможно и дополнительное влияние на характеристики БВМ различных атмосферных условий в разные годы. Так, в 2008-2010 годах среднегодовая температура атлантических водных масс на западной границе Баренцева моря была практически одинаковой ($5.9 \pm 0.1^{\circ}\text{C}$), а на широте 81°N температура ядра БВМ варьировалась от 0.5°C в 2008, -0.5°C в 2009 до -1°C в 2010 году. Данные реанализа показывают различия в осредненном суммарном тепловом потоке с декабря по март в зимы, предшествующие измерениям, то есть в период наиболее интенсивного охлаждения атлантических водных масс. Поток тепла увеличивается от 2008 к 2010 году, что подтверждает гипотезу о дополнительном влиянии на температуру БВМ различных атмосферных условий.

В недавнем исследовании на основе данных реанализа и натуральных данных в центральной части Баренцева моря было показано, что в связи со снижением теплопотерь в Баренцевом море с 2000 года атлантические водные массы больше не охлаждаются так эффективно и в арктический бассейн теперь экспортируются более теплые воды [2]. Другие модельные исследования, однако, показывают, что произошло смещение охлаждающей зоны ближе к полюсу и большая часть тепла,

поступающего из Баренцева моря с БВМ, все еще теряется перед попаданием на континентальный склон [3]. Анализ натуральных измерений, полученных в восточной части Баренцева моря и желобе Святой Анны в августе 2021 и сентябре 2023 года, дает новую информацию по этому вопросу. В 2021 году температура БВМ была невысокой и на разрезе мыс Желания — земля Франца-Иосифа (ЗФИ) составляла -1°C . Температура на всех последующих разрезах до 82°N также составляла -1°C . В 2023 году температура БВМ напротив была высокой и на разрезе Русская Гавань — ЗФИ составляла 0.85°C , а на разрезе мыс Желания — ЗФИ достигала 0.3°C . При этом в оба года температура промежуточных вод в ЖСА с меньшим содержанием атлантических вод, которая разделяет фрамовскую и баренцевоморскую водные массы, составляла -1°C . В результате бокового перемешивания и вертикальной диффузии температура БВМ в 2023 году постепенно уменьшалась при приближении к континентальному склону. На разрезе 80°N температура ядра БВМ уже составляла -0.2°C , при этом соленость ее по мере взаимодействия с менее солеными промежуточными водами также уменьшилась с 34,88 у Русской Гавани до 34,84 на 81°N .

Таким образом, можно сделать вывод, что зона охлаждения атлантических водных масс сместилась ближе к континентальному склону, а механизм охлаждения за счет активной теплоотдачи в атмосферу в Баренцевом море теперь не справляется так же эффективно с охлаждением атлантических водных масс до низких температур, а дополняется охлаждением при взаимодействии БВМ с промежуточными водами в ЖСА в годы, когда температура БВМ превышает температуру этих промежуточных вод.

В последние годы наблюдается сильное понижение солености атлантических водных масс, затекающих в Баренцево море. Это отражается и на солености БВМ, поступающей в ЖСА (соленость уменьшилась с 34.9-34.95 до 34.86 в последние годы). Повышение температуры БВМ с одновременным понижением солености значительно влияет на ее плотность, а, следовательно, может изменяться и скорость распространения БВМ в силу геострофического характера ее движения. Это в свою очередь может повлиять на взаимодействие БВМ с фрамовской водной массой, с которой БВМ встречается в желобе Святой Анны, а также на характеристики поверхностного течения, которое образуется за счет взаимодействия с нижележащим потоком БВМ. Таким образом, понимание причин изменения термохалинных характеристик БВМ, важно для общего понимания глобальной циркуляции в Арктике.

Исследование профинансировано Российским научным фондом, исследовательский проект 23-17-00087.

Список литературы

- 1) Osadchiv A. et al. Structure and circulation of Atlantic water masses in the St. Anna trough in the Kara Sea //Frontiers in Marine Science. – 2022. – Т. 9. – С. 915674.
- 2) Skagseth Ø. et al. Reduced efficiency of the Barents Sea cooling machine //Nature Climate Change. – 2020. – Т. 10. – №. 7. – С. 661-666.
- 3) Shu Q. et al. The poleward enhanced Arctic Ocean cooling machine in a warming climate, Nat. Commun., 12, 2966. – 2021.

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ГИДРОТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАЛТИЙСКОГО МОРЯ МОДЕЛЬЮ INMOM ЗА ПЕРИОД 2012-2021 ГГ.

Захарова Е.В., Фомин В.В., Дианский Н.А.

Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, г. Москва

Ключевые слова: Балтийское море, численное моделирование, гидротермодинамические характеристики.

Многие задачи современной океанологии требуют более точных расчетов гидрологических характеристик. Рассчитанные с помощью численных моделей характеристики могут быть использованы для оценки штормовых условий, характеристик ветрового волнения, уровня моря, а также при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений. Временные ряды гидрологических характеристик могут использоваться для анализа климатической изменчивости.

В рамках настоящей работы модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1] для акватории Балтийского моря была реализована с равномерным шагом сетки с горизонтальным разрешением ~ 1.7 км, количество узлов сетки 705×801 , по вертикали 20 сигма уровней. Модель INMOM, разработанная в ИВМ РАН, относится к классу сигма-моделей морской и океанической циркуляции. В ее основе лежит полная система уравнений гидротермодинамики океана, записанных в координатах сферического слоя в приближениях гидростатики и Буссинеска. Жидкая граница в данной реализации модели проходит в Датских проливах. На жидкой границе задавались среднемесячные значения температуры и солености по данным CMEMS (<https://marine.copernicus.eu>). Уровень моря задавался с дискретностью 1 час по двум станциям: Skagen и Stenungsund (<https://emodnet.ec.europa.eu/>), предварительно данные были отфильтрованы от шумов. В качестве данных атмосферного воздействия использовались метеорологические параметры, доступные в реанализе ERA5 с пространственным разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$.

Ретроспективный расчет гидротермодинамических полей осуществлялся за десятилетний период с 2011 по 2021 год. Для верификации модели были использованы данные контактных и спутниковых наблюдений, доступных в CMEMS. Для температуры и уровня это данные со стационарных станций (INSITU_BAL_NRT_OBSERVATIONS_013_032), с дискретностью измерений от 1 мин до 1 ч в зависимости от станций. Для верификации данных о сплоченности льда и оценки точности воспроизведения температуры поверхности моделью были использованы спутниковые данные с сайта CMEMS. Для спутниковой температуры дискретность данных составляет 1 час (SDMI_BAL_SST_L4_REP_OBSERVATIONS_010_016), а для данных о сплоченности льда – 1 сутки (FMI-BAL-SEAICE_CONC-L4-NRT-OBS).

По результатам расчетов модели за период 2012 по 2021 год был выполнен их анализ, исследована пространственно-временная изменчивость термогидродинамических характеристик.

Численные расчеты проведены с использованием оборудования Межведомственного многопроцессорного суперкомпьютерного центра РАН [<http://www.jscc.ru/>]

Список литературы

- 1) Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на коротко-периодные и долгопериодные атмосферные воздействия. – М. 2013 Физматлит, 271с.

ПРИДОННЫЙ ПЛОТНОСТНОЙ ПОТОК В ЦЕНТРАЛЬНОМ КАНАЛЕ РАЗЛОМА ВИМА

Зуев О.А., Селиверстова А.М., Фрей Д.И.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: разлом Вима, Антарктическая донная вода, абиссальный поток, термохалинная структура, гидрохимическая структура.

В работе представлены результаты комплексных измерений в центральном канале разлома Вима, расположенном в Атлантическом океане в районе 11° с.ш. между 38° з.д. и 46° з.д. Столь подробное исследование вдоль всего разлома Вима проведено впервые [1]. В центральном канале выполнено 30 глубоководных станций, на каждой из которых проводились измерения температуры, солёности и скорости течений, а на большинстве также измерялись гидрохимические показатели, такие как кислород, кремний и биогенные элементы. Таким образом была получена возможность проследить изменение свойств Антарктической донной воды (ААДВ) на протяжении 900 км вдоль всего разлома Вима на основе натурных данных. Также благодаря учащенным станциям вблизи главной седловины разлома исследована структура гидравлически управляемого потока и его зависимость от рельефа дна. Дополнительным маркером происходящих процессов служили значения основных гидрохимических показателей. Обработка данных производилась стандартными методами: для CTD программным пакетом аналогичным SbeDataProcessing; для LADCP программным пакетом LDEO Software version IX.10 [2] с дополнительным учетом приливных сил с помощью программного обеспечения, описанного в [3]; гидрохимических показателей в соответствии с методиками, принятыми в современной гидрохимии [4].

На динамику вод в разломе Вима значительное влияние оказывает батиметрия – практически гладкое дно в его западной части и весьма изрезанное в районе главной седловины и восточнее во многом обуславливает поведение потока ААДВ. В западной части наблюдается нижняя застойная зона с околонулевыми скоростями и практически неизменной потенциальной температурой. Данная зона занимает около 500 нижних метров, а основной поток располагается над ней – на глубинах 3800-4600 м, скорости в нем составляют 10-20 см/с. Однако по достижении главной седловины поток резко ускоряется и заглубляется, что способствует значительному перемешиванию воды, и как следствие ее потеплению. При этом самая холодная часть потока вообще не может преодолеть седловину. Данный слой отличается как по значениям потенциальной температуры, так и по большинству гидрохимических показателей. Наименьшие потенциальная температура (ниже 1.4°C), содержание кислорода (меньше 5.7 мл/л), водородный показатель (7.93), наибольшее содержание фосфора ($1.55\ \mu\text{M}$) и кремния ($56\ \mu\text{M}$) отмечены здесь и отсутствуют за главной седловиной. Вертикальное распределение вышеперечисленных показателей хорошо согласуется с наблюдавшейся стратификацией воды.

В свою очередь в восточной части разлома наблюдается сильное заглубление потока. Ускоряясь над главной седловиной, поток достигает максимальных скоростей более 40 см/с в месте наибольшего уклона дна в районе 40.3° з.д. Важной деталью является разное поведение потока в зависимости от глубины. В нижних 300 м от дна зафиксированы скорости около 20 см/с строго в восточном направлении. В следующих 300 м (глубины 4800-5100 м) скорости уже около 30 см/с и направление меняется на восток-юго-восток. А наибольшие скорости близкие к 50 см/с обнаружены на глубинах 4400-4800 м с направлением восток-северо-восток. Таким образом поток распадался на отдельные, по разному ведущие себя струи. Нижние 600 м имеют практически одинаковую температуру, при этом гидрохимические показатели различаются, так как обладают более долгим временем релаксации. Соответственно в данном месте вода интенсивно перемешивается, а менее плотная вода не может преодолеть пикноклин и продолжает движение в слое 4400-

4800 м в виде интрузии. При этом интрузионный поток и его продолжение присутствует на всем протяжении восточной части разлома, а придонный поток наблюдается только на следующей за склоном станции, далее его энергия диссипирует и он прекращается. Подобное расщепление придонного гравитационного течения может встречаться в глубоководных каналах, более подробно явление исследовано например в [5]. Соответствующим образом ведут себя и изотермы – на станциях склона с придонным течением наблюдается заглубливание изотерм 1.55 – 1.65 °С на глубину около 150 м, далее они возвращаются на свой горизонт. Так называемый гидравлический скачок происходит при резком заглубливании более плотных вод и может способствовать усилению внутренних волн [6]. Одним из результатов столь сильного течения является потепление воды более чем на 0.15 °С за 100 км неровного дна вблизи главной седловины разлома. К концу восточной части придонная температура теплеет еще на 0.1 °С и достигает 1.6 °С. Данный процесс также хорошо виден на гидрохимических показателях: в восточной части разлома значения водородного показателя, содержания кремния и фосфора у дна соответствуют значениям в западной на глубинах около 4000-4500 м.

В итоге распределение и преобразование ААДВ в центральном канале разлома Вима имеет следующие характерные черты. Незначительную изменчивость в западной части разлома, вода у входа и перед седловиной имеет практически одинаковые характеристики. Основной поток проходит в более чем 500 м от дна со скоростями около 15 см/с. Резкое заглубливание и ускорение потока и интенсификация процессов перемешивания наблюдается сразу за главной седловиной разлома и продолжается вплоть до 40.3° з.д. Результатом является значительное изменение характеристик ААДВ в восточной части разлома Вима, таких как повышение придонной температуры, солености и водородного показателя, понижение содержания кремния, фосфора и кислорода.

Анализ данных выполнен при поддержке гранта РФФ 24-27-00181.

Список литературы

- 1) Morozov E. G. et al. Antarctic Bottom Water in the Vema Fracture Zone // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2023. – Т. 128. – №. 8. – С. e2023JC019967.
- 2) Visbeck M. Deep velocity profiling using lowered acoustic Doppler current profilers: Bottom track and inverse solutions // Journal of atmospheric and oceanic technology. – 2002. – Т. 19. – №. 5. – С. 794-807.
- 3) Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. – 2002. – Т. 19. – №. 2. – С. 183-204.
- 4) Бордовский О. К., Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана // М.: ИО РАН. – 1992
- 5) Зацепин А. Г. и др. Лабораторное и численное исследования процесса распространения плотностных течений по склону дна // Океанология. – 2005. – Т. 45. – №. 1. – С. 5-15.
- 6) Morozov, E.G. et al. The Straits of Gibraltar and Kara Gates: A Comparison of internal tides // Oceanol. Acta 2003, 26, 231–241

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ШЕЛЬФЕ УБЫВАЮЩЕЙ ГЛУБИНЫ

Иванов М.П., Долгих С.Г.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: лазерный измеритель вариаций давления гидросферы, давление гидросферы, поверхностное ветровое волнение, дискретное Фурье-преобразование.

Данная работа посвящена исследованию поверхностного ветрового волнения и его трансформации при движении по шельфу убывающей глубины. За основу были взяты данные лазерных измерителей вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ) [1], которые были установлены на шельфе Японского моря в мае 2015 года на базе МЭС ТОИ ДВО РАН «м. Шульца». ЛИВДГ были установлены на глубинах 27 и 33 м. При движении по шельфу от места генерации поверхностное ветровое волнение трансформируется, отдавая часть своей энергии дну. Трансформация происходит на разных глубинах в зависимости от длины и периода ветрового волнения. Для изучения этой трансформации используются данные ЛИВДГ и математическое моделирование.

В математической модели, построенной с использованием дискретного Фурье преобразования [2], используются натурные данные лазерно-интерференционных приборов. Данное преобразование эффективно применяется для анализа волновых процессов в условиях переменной глубины. При установке ЛИВДГ на разной глубине для интерпретации натурных данных используются различные коэффициенты преобразования, которые были рассчитаны ранее в работе [3]. Суть метода изучения законов трансформации заключается в следующем: данные измерительного прибора вносятся в математическую модель, далее, на основе дисперсионного соотношения, модель пересчитывает, какое волнение будет при другой глубине и на последнем этапе происходит сопоставление модельных и натурных данных.

Путем подстановки натурных данных ЛИВДГ при установке на глубине 27 метров в модель и программного изменения глубины на 33 метра было рассчитано поверхностное ветровое волнение для новой глубины. Сопоставление модельных и натурных данных показало удовлетворительное сходство данных. Это подтверждает эффективность математической модели при изучении законов трансформации поверхностного ветрового волнения при движении по шельфу убывающей глубины.

Работа выполнена в лаборатории Нелинейной гидрофизики и природы катастроф ТОИ ДВО РАН по соглашению № 075–15-2022-1127 от 1 июля 2022 г.

Список литературы

- 1) Долгих Г.И., Долгих С.Г., Ковалев С.Н., Швец В.А., Чупин В.А., Яковенко С.В. Лазерный измеритель вариаций давления гидросферы // Приборы и техника эксперимента. 2005. №6. С.56-57
- 2) Некрасов А.В., Пелиновский Е.Н. (ред.) Практикум по динамике океана // Гидрометеиздат, 1992. — 320 с.
- 3) Dolgikh, G.; Dolgikh, S.; Ivanov, M. Verification of data from supersensitive detector of hydrosphere pressure variations. Sensors 2023, 23, 6915

КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ ЧЕРЕЗ БЕРИНГОВ ПРОЛИВ.

Игнатъев Д.Е.¹, Гордеева С.М.^{1,2}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Берингов пролив, потоки тепла и соли, объемный расход воды, восточная Арктика, течения.

Через Берингов пролив (БП) тихоокеанские воды поступают в Северный Ледовитый океан (СЛО), благодаря течениям, формируемым разностью плотности вод, ледовыми условиями и рельефом дна [1]. Существует мнение, что потоки воды в проливе подчиняются ветровой циркуляции в регионе [2]. В связи с изменениями климата поступление вод из Тихого океана в последние десятилетия увеличивается, что влияет на термохалинную структуру, способствует уменьшению ледяного покрова, солености, увеличению содержанию биогенных веществ арктических морей [3]. Целями исследования являются оценка изменчивости потоков воды, тепла и соли через Берингов пролив за последние 30 лет и оценка связей потоков с ветровым режимом.

В качестве исходных глубоководных данных выбран реанализ GLORYS12V1 (https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/), а атмосферных данных – реанализ ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) портала Copernicus. Из баз данных через 5' (2979,6 м) по разрезу вдоль параллели 65°75' с.ш. от 170°5' до 168°1' з.д. взяты среднемесячные значения меридиональной составляющей скорости течений, температуры и солености воды на 18 горизонтах исходя из рельефа дна от 0 до 52 м за период с января 1993 по декабрь 2020 года, а также скорости ветра, формирующего дрейфовый меридиональный поток воды через БП. Данные о ветре рассмотрены в квадрате 63–68° с.ш. 160–175 з.д. и усреднены в двух областях: севернее БП и южнее БП, так как предварительный анализ показал, что в этих областях часто отмечаются противоположные направления зонального ветра. Объемный расход, тепловой поток и поток соли рассчитаны согласно стандартной методике [4].

В среднем через БП скорость течения составляет 33 см/с, а основной перенос вод направлен в Чукотское море и сосредоточен в восточной части разреза (67 см/с на поверхности у берегов Аляски и 60 см/с на глубине 20 м западнее островов Диомида). Динамика западной части, где наблюдается противотечение (1 см/с) вдоль Чукотского полуострова, значительно слабее.

Вертикальное распределение температуры и солености воды соответствует распределениям основных потоков. У берегов Аляски южное течение несет наиболее теплые и распресненные воды (2,27 °С, 31,0 епс). А относительно холодные и соленые воды (0,27 °С, 32,9 епс), приносимые с севера медленно текущим потоком, занимают практически весь придонный объем восточной части пролива таким образом, что в этой части пролива пикноклин залегает на глубине 10 метров, а в восточной части – заглубляется с приближением к материку до 40 метров.

Основные потоки в среднем многолетнем усреднении, проходящие через разрез в Арктику гораздо больше, чем направленные на юг, и в сумме составляют: объемный расход – 1,42 Св, поток тепла – 17,0 ТВт, поток соли – 47,1 т/с.

Внутригодовая дисперсия интегральных потоков воды, тепла и соли через пролив достаточно велика и на её фоне линейный тренд не заметен. Для сглаживания дисперсии применен фильтр скользящего среднего с окном 12 месяцев, который позволил сделать оценки тренда более выраженными, но величины трендов расхода воды – 0,001 Св в год, потока тепла – 0,11 ТВт в год и потока соли – 0,05 т/с за год оказались не значимы при уровне значимости $\alpha=0,05$. Однако при детальном рассмотрении в пространстве разреза наблюдаются области значимых показателей, разность между которыми приводит к нулевому балансу по всему разрезу. Значимое увеличение

текущих из Тихого океана объемов воды в верхних слоях восточной части разреза ($1,65 \text{ м}^3/\text{с}$ в мес.), сопровождающееся потеплением (у берега Аляски $7 \text{ КВт}/\text{м}^2$ в мес. и восточнее островов Диомида $4 \text{ КВт}/\text{м}^2$ в мес.) и осолонением ($9,1 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ в мес.) отчасти нивелируется значимым усилением потока из Северного Ледовитого океана вдоль п-ова Чукотка с охлаждением ($-1,14 \text{ м}^3/\text{с}$ в мес. и $-1,5 \text{ КВт}/\text{м}^2$ в мес.) и опреснением всей толщи воды ($-3,3 \text{ г}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ в мес.). Таким образом, общая динамика вод в проливе с течением времени увеличивается.

В межгодовой изменчивости тренды зональной скорости ветра севернее БП ($-0,007 \text{ м}/\text{с}$ в год) и южнее БП ($-0,0006 \text{ м}/\text{с}$ в год) оказались незначимы при уровне значимости 0,05.

Для выявления связи ветра с потоками воды рассмотрена корреляция интегрального потока на каждой вертикали разреза через БП со скоростью составляющих ветра севернее и южнее БП. Для зонального ветра в целом корреляция не значима и меняется в пределах ± 0.3 в зависимости от рассматриваемого участка. При более детальном рассмотрении выявлено, что значимая корреляция потоков воды с ветром достигает 0,44 и отмечается по краям пролива. Увеличение скорости ветра в западном (отрицательном) направлении усиливает поток воды в направлении СЛО, что ярко выражено на востоке пролива, и также усиливает поток в Тихий океан, что подтверждается отрицательной корреляцией у берегов Северной Америки и положительной вдоль п-ова Чукотка. Таким образом, усиление восточного ветра в регионе БП усиливает динамику вод по обеим сторонам пролива. В основном поток воды через БП определяется меридиональным ветром, что подтверждается значимой корреляцией 0.4-0.6, возрастающей к востоку пролива, что свидетельствует об усилении потока из Тихого океана при усилении южного ветра.

Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН FMWE-2024-0028.

Список литературы

- 1) Woodgate R., Peralta-Ferriz C. Warming and Freshening of the Pacific Inflow to the Arctic From 1990-2019 Implying Dramatic Shoaling in Pacific Winter Water Ventilation of the Arctic Water Column // Geophysical Research Letters. 2021. V.48, № 9. P. e2021GL092528.– DOI: 10.1029/2021GL092528.
- 2) Danielson S.L., Weingartner T.J., Hedstrom K.S. et al. Coupled wind-forced controls of the Bering-Chukchi shelf circulation and the Bering Strait throughflow: Ekman transport, continental shelf waves, and variations of the Pacific-Arctic sea surface height gradient // Progress in Oceanography. 2014. V. 125. P. 40–61. (<https://doi.org/10.1016/j.poccean.2014.04.006>)
- 3) Жук В.Р., Кубряков А.А. Влияние Восточно-Сибирского течения на водообмен в Беринговом проливе по спутниковым альтиметрическим данным // Океанология.– 2021. Т.61, № 6. С. 856–868. – DOI: 10.31857/S0030157421060174
- 4) Наумов Л.М., Гордеева С.М. Боковой перенос тепла и соли в Лофотенском бассейне: сравнение на основе трёх баз данных // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 43–55.

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОД ГРЕНЛАНДСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДА

Каледина А.С.^{1,2}, Башмачников И.Л.^{1,2}, Будянский М.В.³, Улейкий М.Ю.³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

³Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Гренландское море, глубокая конвекция, заток вод, атлантические воды, лагранжев подход

Глубокая конвекция в Гренландском море является важным климатообразующим фактором в северном полушарии. На настоящий момент выделяют следующие группы факторов, способствующих вертикальному перемешиванию: поток тепла и пресной воды из океана в атмосферу, интенсивность циклонической циркуляции, ледообразование, а также одним из наименее изученных остается океаническая адвекция тепла и соли. Однако основные механизмы долгопериодной изменчивости глубокой конвекции в Гренландском море остаются предметом дискуссий.

Ранее нами была проделана работа по анализу изменчивости плотностных инверсий в верхнем слое Гренландского моря в районе наиболее частого развития глубокой конвекции [1]. Данное исследование инверсий позволяет охарактеризовать условия, которые предшествуют конвекции, и строить гипотезы об основных механизмах, приводящих к конвективному перемешиванию, в том числе к развитию глубокой конвекции. Совместный анализ факторов, которые могли приводить к возникновению наблюдавшихся плотностных инверсий, позволил выделить следующие основные механизмы дестабилизации верхнего слоя Гренландского моря: теплоотдача из океана в атмосферу; теплоотдача из океана в атмосферу при положительных значениях испарение-осадки; заток поверхностных вод с теплоотдачей в атмосферу [2]. Однако до сих пор остается недооценен вклад заток вод в центральную часть Гренландского моря из-за сложности идентификации этих заток в открытом океане.

Поэтому в своей работе мы используем лагранжев подход для идентификации вод, поступающих в Гренландское море, которые способствуют формированию поверхностного слоя. Для анализа нами были выбраны характерные годы – 2011 и 2012, в которые наблюдалась наиболее интенсивная конвекция за последние 30 лет. Расчёт выполнялся назад во времени, фиксировались время и координаты пересечения частицей одного из четырёх выбранных разрезов. Разрезы определялись по данным океанического реанализа GLORYS12V1, они соответствуют путям распространения четырёх типов вод: атлантические воды, рециркулирующие атлантические воды, полярные воды и поверхностные воды Гренландского моря. Для расчёта был выбран горизонт 100 м, данная глубина позволяет минимизировать сезонность процессов, при этом учесть все рассматриваемые нами типы вод.

В результате мы наблюдаем, что полярные воды практически не проникают в центральную часть Гренландского моря. В летний период, когда происходит ослабление циклонического круговорота, наблюдается более интенсивное поступление атлантических, рециркулирующих атлантических и поверхностных гренландских вод. Такие типы вод также выделяются на TS-диаграммах, однако сложность заключается в отделении рециркулирующих атлантических от атлантических вод, помимо этого их характеристики значительно меняются от года к году. Данные результаты подтверждают актуальность применения лагранжева подхода и важность дальнейшего анализа параметров, которые можно получить с применением этого метода.

Список литературы

- 1) Каледина А.С., Башмачников И.Л. Характеристики плотностных инверсий в Гренландском море в холодный сезон за 1993–2019 годы // Морской гидрофизический журнал, 2023. – Т. 39, – № 1. – С. 21–30. EDN MOQPNJ. doi:10.29039/0233-7584-2023-1-21-30
- 2) Каледина А.С., Башмачников И.Л. Механизмы формирования плотностных инверсий в районах регулярного развития глубокой конвекции в Гренландском море // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле, 2023. – Т. 68. – 4. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2023.407>

СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ВОД ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЫ И ЗАЛИВА ШЕЛИХОВА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Каледина А.С.^{1,2}, Семкин П.Ю.³

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Научный фонд "Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена", г. Санкт-Петербург

³ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Охотское море, Пенжинская губа, приливы, приливные течения, гармонический анализ

Пенжинская губа и залив Шелихова являются уникальными акваториями Мирового океана по своей динамике вод. В данном регионе наблюдаются одни из самых высоких приливов в мире (высота прилива порядка 13 м). Основной особенностью залива Шелихова и Пенжинской губы можно отметить наличие суточного типа прилива в отличие, например, от залива Фанди и Мезенской губы, где также наблюдаются одни из самых высоких приливов, но уже полусуточных [1]. Помимо уникальной динамики вод северо-восточной части Охотского моря, это важный район с точки зрения рыбохозяйства. Река Пенжина, впадающая в Пенжинскую губу и являющаяся одной из крупнейших рек Камчатки и всего Дальнего Востока России, служит местом воспроизводства кеты, а также других промысловых и эндемичных видов рыб [2, 3]. Поэтому изучение структуры и динамики вод данного региона является неотъемлемой частью в понимании гидрохимических процессов и их воздействия на экосистему.

В работе использованы данные натурных измерений с сетки океанологических станций за июль 2023 г., полученные в ходе морской экспедиции лаборатории гидрохимии ТОИ ДВО РАН в заливе Шелихова и Пенжинской губе. Стоит отметить, что подобные наблюдения не проводились в данном регионе Охотского моря с 1980-х гг. В результате были получены: пространственное распределение температуры и солёности в данной акватории, суточная изменчивость температуры, солёности, уровня моря и скорости поверхностных течений в вершине Пенжинской губы во время квадратного прилива и её более мористой части.

Для анализа суточной изменчивости скорости течения и уровня применялся гармонический анализ с использованием модифицированного метода АНИИ (Арктический научно-исследовательский институт) [4], описанного в работе [5]. В данной модификации гармонический анализ проводится с учётом 1/3-, 1/4-, 1/6-, 1/8-суточных гармоник. Также важной особенностью данного метода является возможность производить гармонический анализ на коротком ряде данных длиной 24 часа [4, 5].

По мере продвижения к вершине Пенжинской губы температура воды увеличивается с 2 до 13 °С, а солёность уменьшается с 33.00 до 16.17 psu, что связано с воздействием стока рек Пенжина и Таловка. По вертикали температура и солёность однородны, такая структура характера для акваторий с интенсивным приливным перемешиванием. Однако в северо-западной части залива Шелихова приливное воздействие ослабевает, наблюдается стратификация вод, в отдельных районах у дна регистрируются даже отрицательные температуры.

В суточной изменчивости в вершине губы наступление полной воды (ПВ) совпадает с минимумом температуры, максимумом солёности и минимумом скорости течения. В свою очередь наступление малой воды (МВ) совпадает с максимумом температуры, минимумом солёности и минимумом скорости течения. В более мористой части Пенжинской губы наступление максимумов и минимумов температуры, солёности и скорости течения происходит с запаздыванием в несколько часов от наступления ПВ и МВ. Максимальные скорости течений во время прилива и отлива в

двух точках различны и в вершине губы уменьшаются на 50 см/с. Также наблюдаются некоторые различия в характере течений.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-77-10001).

Список литературы

- 1) Гидрометеорология и гидрохимия морей / Отв. ред. Ф. С. Терзиев. СПб., 1998. Т. 9. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия.
- 2) Горин С. Л., Коваль М. В. О комплексных исследованиях в устьевой области рек Пенжина и Таловка в 2015 г // Труды ВНИРО. 2015. Т. 158. С. 186-189.
- 3) Горин С. Л., Коваль М. В., Сазонов А. А., Терский П. Н. Современный гидрологический режим нижнего течения реки Пенжины и первые сведения о гидрологических процессах в ее эстуарии (по результатам экспедиции 2014 г.) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2015. №. 37. С. 33-52.
- 4) Максимов И. В. Основные приемы производства и камеральной обработки наблюдений над течениями в море // Тр. АНИИ, Т. 155. 1941. 330 с.
- 5) Май Р. И., Марчукова О. В. Метод гармонического анализа приливов по суточной серии наблюдений с учетом мелководных волн // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7: Геология, география. 2012. № 4. С. 116-128.

^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{137}Cs В ВОДАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА ЗИМОЙ 2022 И ЛЕТОМ 2023 ГОДА

Калюжный Д.С., Соколов Д.Д., Горячев В.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

Ключевые слова: ^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{137}Cs , метод сорбции, объемная активность.

Естественные и искусственные радионуклиды используются как трассеры исследования скоростей многих процессов, протекающих в морской среде. Отличие в происхождении и временных характеристик позволяют оценить количественное и качественное изменение полей океана под воздействием природных и антропогенных факторов.

В данной работе измерялась активность изотопов различного происхождения, природных – ^{228}Ra (период полураспада 5,75 лет), ^{226}Ra (период полураспада 1600 лет) и антропогенного – ^{137}Cs (период полураспада 30 лет).

С целью исследования содержания радионуклидов в морской воде в районе п-ова Камчатка, о. Сахалин и южной части Приморья в ходе 65-го (26 ноября – 4 декабря 2022 г.) и 68-го (05 августа – 15 сентября 2023 г.) рейсов на научно-исследовательском судне «Академик Опарин» были отобраны пробы поверхностной воды объемом 200 литров при помощи проточной системы. Забор воды для проточной системы осуществлялся с глубины 3 м. В общей сложности было отобрано 75 проб. Для концентрации изотопов вода прокачивалась со скоростью 2 л мин⁻¹ через последовательную систему емкостей, в которых находились избирательные сорбенты. Для сорбции ^{137}Cs использовался сорбент на основе ферроцианида меди на целлюлозном носителе, а изотопы радия извлекались сорбентом на основе оксида марганца MnO_2 , нанесенного на акриловое волокно [1]. Далее сорбенты высушивались в сушильном шкафу при температуре 70 °С и сжигались в муфельной печи при температуре 400 °С. Активность ^{226}Ra определяли по дочернему продукту ^{214}Bi (энергия 609 кэВ), ^{228}Ra по ^{228}Ac (энергия 583,9 кэВ), ^{137}Cs по $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (энергия 661,7 кэВ). Перед измерением активности сорбенты для изотопов радия герметизировались для установления равновесия дочерних продуктов распада в течение месяца. Гамма-активность проб определялось на γ -спектрометре с детектором из сверхчистого германия GEM150. Время измерения проб составляла от 1 до 2 суток.

В результате измерений установлено, что объемная активность ^{137}Cs в Японском море изменялась от 1,1 до 2,9 Бк/м³, в Охотском море: от 1 до 1,8 Бк/м³ и в Тихом океане: от 1 до 2,2 Бк/м³. Объемная активность ^{228}Ra в Японском море изменялась от 0,5 до 3,1 Бк/м³, в Охотском: от 0,11 до 2,8 Бк/м³, в Тихом океане: от 0,2 до 2,2 Бк/м³. Объемная активность ^{226}Ra в Японском море изменялась от 0,5 до 2,1 Бк/м³, в Охотском море: от 1 до 3 Бк/м³, в Тихом океане от 1 до 3 Бк/м³. Отношение $^{228}\text{Ra}/^{226}\text{Ra}$ на всем маршруте изменялось от 0,1 до 2,2 Бк/м³.

Максимальные значения ^{228}Ra наблюдались в прибрежных водах, а ^{226}Ra в открытой части моря. Это связано с разными периодами полураспада изотопов и отдаленности от источника, которым является речной сток с высоким содержанием радионуклидов. Также средние значения изотопов радия были выше в летний период, нежели в зимний. Повышенные значения ^{137}Cs , ^{228}Ra и ^{226}Ra в Японском море наблюдались в водах Цусимского течения, что подтверждается другими работами в этом регионе [2]. Концентрация ^{137}Cs на всем маршруте была фоновой и не превышала допустимых значений.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Список литературы

- 1) Bandong BB, Volpe AM, Esser BK, Bianchini GM. Pre-concentration and measurement of low levels of gamma-ray emitting radioisotopes in coastal waters. *Appl Radiat Isot.* 2001 Nov;55(5):653-65. doi: 10.1016/s0969-8043(01)00081-1. PMID: 11573799.
- 2) Spatial variations of ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{137}Cs , and ^{228}Th activities in the southwestern Okhotsk Sea / M. Inoue, K. Yoshida, S. Nagao [et al.] // *Journal of Environmental Radioactivity.* – 2012. – Vol. 104, No. 1. – P. 75-80. – DOI 10.1016/j.jenvrad.2011.09.007. – EDN PMOYWH.

КИНЕМАТИКА ВНУТРЕННИХ ВОЛН ВБЛИЗИ ПРИКРОМОЧНОЙ ЛЕДОВОЙ ЗОНЫ В АРКТИКЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Козлов И.Е.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, кинематика волн, фазовая скорость, спутниковая радиолокация, прикромочная ледовая зона, Арктика, арх. Шпицберген, Плато Ермак.

В настоящей работе на основе обработки 32 спутниковых радиолокационных изображений (РЛИ) Sentinel-1A/B за июль-август 2018 г. для северной части пролива Фрама и Плато Ермак выполнен анализ изменений фазовой скорости и направления распространения короткопериодных внутренних волн (КВВ) при их распространении из районов открытой воды в прикромочную ледовую зону (ПЛЗ). Выбранные в ходе анализа РЛИ составили 16 пар последовательных измерений с временным интервалом между съемками около 50 минут. В ходе обработки данных построено 564 разреза, позволяющих оценить фазовую скорость КВВ, а также горизонтальную скорость дрейфа льда в ПЛЗ. При идентификации пакеты КВВ выбирались таким образом, чтобы они находились вблизи ПЛЗ на расстоянии не более 50 км и распространялись в сторону ледовых полей или из покрытых льдом районов в сторону открытой воды. В ходе выполненного анализа получены следующие результаты.

1) Поверхностные проявления (ПП) КВВ идентифицируются, как правило, на расстоянии примерно до 50 км (в редких случаях до 100 км) вглубь ПЛЗ, при этом интенсивность ПП существенно зависит от фоновых концентрации льда внутри ПЛЗ, ветровых условий, а также расстояния от ледовой кромки. При существенно неоднородном поле приводного ветра (качественно оцениваемой по пространственным вариациям РЛ-сигнала), интенсивной динамике льда в ПЛЗ (под влиянием ветра или циркуляции океана) и высокой сплоченности льда в ПЛЗ (>40-50%) интенсивность ПП КВВ быстро снижается при удалении от ледовой кромки. При достаточно однородных фоновых условиях ПП КВВ уверенно идентифицируются, как правило, на расстоянии до 50 км вглубь ПЛЗ.

2) Ключевыми признаками ПП КВВ является не только их когерентная структура, но и наличие отличной от нуля горизонтальной скорости. Однако в отдельных случаях последнее условие не выполнялось при наличии выраженной динамики льда в ПЛЗ (вихревых движений, струйных течений). Например, в случае наблюдения нескольких последовательных пакетов КВВ (при генерации от одного источника каждый приливной период), часть из которых находилась внутри ПЛЗ, а другая часть распространялась в открытой воде в направлении льда, ПП КВВ внутри ПЛЗ могли быть стационарными или двигаться в обратную сторону в отличие от ПП КВВ на участках открытой воды. Связано ли такое стационарирование ПП КВВ в ПЛЗ со встречным движением фонового потока (динамикой ПЗЛ) или сменой знака приливного течения требует дальнейшего изучения.

3) В большинстве случаев фазовая скорость ПП КВВ снижалась на 10-30% при вхождении в область ПЛЗ. Анализ проявлений КВВ, распространяющихся на юго-запад из центральной части Плато Ермак, показал характерное снижение значений фазовой скорости КВВ от 0,6-0,7 м/с до 0,3-0,5 м/с. В настоящий момент ведется анализ связи наблюдаемых изменений фазовой скорости КВВ со скоростью и направлением дрейфа льда в ПЛЗ.

4) Анализ РЛИ показал, что в большинстве случаев прохождение КВВ сопровождается аккумуляцией льда и образованием характерных ледовых полос в зонах конвергенции поверхностных

течений на морской поверхности, формирующихся под влиянием КВВ. Ширина таких полос может достигать 3-5 км на фоне полей более разреженного льда. Существенных изменений направления распространения КВВ при их распространении в сторону ПЛЗ или в обратную сторону не отмечалось.

Настоящее исследование выполнено при поддержке грантов РНФ № 21-17-00278, 24-17-00327.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ПО ДАННЫМ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЛЕТОМ 2023 Г.

Козлов И.Е., Коржуев В.А., Павлов М.И., Zubov A.G.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: динамические процессы моря, морская турбулентность, субмезомасштабные процессы, внутренние волны, вихри, фронты, Баренцево море, Карское море, Арктика.

В настоящей работе представлены результаты экспедиционных исследований в Карском и Баренцевом морях, полученные в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» в рамках программы «Плавучий университет-2023» с 15 июля по 3 августа 2023 г. Одной из научных задач экспедиции было исследование характеристик турбулентности верхнего слоя арктических морей на основе измерений микроструктурного зонда Sea & Sun Technology MSS60 (Германия).

Одной из основных задач микроструктурных измерений было определение влияния субмезомасштабных динамических процессов верхнего слоя моря (внутренних волн, фронтальных разделов и вихревых структур) на характеристики турбулентности. Известно, что некоторые из них, в частности, интенсивные внутренние волны (ВВ) могут оказывать существенное влияние на перенос тепла в океане за счет трансформации приливной энергии и возникновения турбулентности при их обрушении [1, 2, 3].

В ходе экспедиции микроструктурные измерения проводились в верхнем 200-метровом слое моря как на отдельных станциях, так и в ходе учащенных серий. Измерения были выполнены таким образом, чтобы можно было оценить характеристики турбулентности как в динамически активных районах с выраженным наличием интенсивных внутренних волн и вихрей, границ водных масс и фронтальных разделов, так и в относительно спокойных районах.

В общей сложности в ходе экспедиции было получено 239 микроструктурных профилей. Глубина зондирования в разных районах существенно отличалась. Так, на первом полигоне в проливе Карские Ворота, известном генерацией интенсивных КВВ [4, 5], и в его окрестностях глубина зондирования в среднем не превышала 50 м. Это было обусловлено необходимостью выполнять вертикальные профили с максимальной частотой, порядка 2-3 минут между зондирования, чтобы разрешить пакеты КВВ с характерными периодами в диапазоне 5-20 минут. В отдельных точках разрезов выполнялось два-три последовательных измерения, во время продолжительных 6-часовых дрейфов - непрерывные серии. На втором полигоне на северо-западе Карского моря глубина зондирования достигала 100 м и состояла в основном из 2-3 последовательных измерений на каждой станции. На данном полигоне микроструктурные измерения проводились на периферии и внутри вихрей, наблюдавшихся в остаточных формах льда. Заключительным этапом работ было выполнение стандартного разреза от м. Желания до арх. Земля Франца-Иосифа. В ходе этого разреза методика измерений была той же, но до глубин 150-200 м. Это позволили охватить измерениями также слой атлантической водной массы, располагавшейся на глубинах от 60 до 200 м.

В настоящей работе будут представлены результаты предварительного анализа микроструктурных измерений, выделены районы и процессы, определяющие повышенные относительно фона значения скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (СДКЭТ). Фоновые значения СДКЭТ в различных районах находились в диапазоне $10^{(-8)}-10^{(-10)}$ Вт/кг. Всплески значений СДКЭТ наблюдались в слое сезонного пикноклина, на границах холодного промежуточного слоя и относительно теплой атлантической воды, где в отдельных эпизодах они достигали значений в диапазоне $10^{(-4)}-10^{(-6)}$ Вт/кг.

Настоящее исследование выполнено в рамках гос. задания № FNNN-2024-0017. Данные натурных измерений получены в рамках программы «Плавучий университет» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации при координации Московского физико-технического института.

Список литературы

- 1) Rippeth T.P., Vlasenko V., Stashchuk N., Scannell B.D., Green J.A.M., Lincoln B.J., Bacon S. Tidal conversion and mixing poleward of the critical latitude (an Arctic case study) // *Geophys. Res. Lett.* 2017. V. 44, № 24. P. 12349–12357.
- 2) Fer I., Koenig Z., Kozlov I.E., Ostrowski M., Rippeth T.P., Padman L., Kolås E. Tidally forced lee waves drive turbulent mixing along the Arctic Ocean margins // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, № 16. P. 1–10.
- 3) Kozlov I., Atadzhanova O., Zimin A. SAR observing large-scale nonlinear internal waves in the White Sea // *Remote Sens.* 2022. V. 147. P. 99–107.
- 4) Morozov E.G., Kozlov I.E., Shchuka S.A., Frey D.I. Internal tide in the Kara Gates Strait // *Oceanology.* 2021. V. 57. P. 8–18.
- 5) Kozlov I.E., Kopyshov I.O., Frey D.I., Morozov E.G., Medvedev I.P., Shiryborova A.I., Silvestrova K.P., Gavrikov A.V., Ezhova E.A., Soloviev D.M., et al. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // *Remote Sensing.* 2023. V. 15. P. 5769. <https://doi.org/10.3390/rs15245769>

ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПЛЮМА РЕКИ ИОКАНГА ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Коник А.А., Осадчиев А.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Ключевые слова: речной плюм, спутниковые изображения, Баренцево море.

С территории Кольского полуострова в море впадает множеством рек, пресноводный сток которых может весомо влиять на гидрологическую структуру, гидрохимические и биооптические показатели прибрежных вод Баренцева моря [1]. В последние десятилетия значительное число исследований было посвящено крупным речным плюмам (площадью более 100 км²) в морях Арктики, в то время как плюмы небольших арктических рек остаются почти не изучены, и сведения об их пространственно-временной изменчивости остаются отрывочными. Одна из основных причин – сложность проведения натурных измерений в области распространения плюмов небольших рек. Решение данной проблемы кроется в использовании альтернативных методов, к которым можно отнести анализ поверхностных проявлений речных плюмов на оптических и радиолокационных данных дистанционного зондирования.

В этой работе рассматривается плюм, формируемый рекой Иоканга, одной из крупнейших рек Кольского полуострова, впадающей в Святоносский залив на границе Баренцева и Белого морей. Цель данной работы – оценка динамики внешней границы (основного фронта) плюма реки Иоканга в период высокого расхода (с марта по август) в 2000–2023 годах по данным дистанционного зондирования. В качестве исходных данных было использовано 299 безоблачных изображений видимого диапазона высокого и среднего разрешения спутников Landsat-7/8/9, Sentinel-2A/B и Sentinel-3A/B. За тот же период с разницей от 6 до 12 часов было проанализировано 102 высоко-разрешающих радиолокационных изображения спутников Sentinel-1A/B в режиме съемки EW.

Метод определения внешней границы плюма реки Иоканга для оценки её сезонной динамики заключался в следующем. Вначале выполнялось детектирование границы на оптических изображениях видимого диапазона как резкой и узкой фронтальной линии, которая часто характеризуется белой полосой и является границей внутренних вод речного плюма и внешних морских вод [2]. Затем в те же даты анализировались данные радиолокационных изображений (РЛИ) с помощью программы SNAP, которые заранее приводились к правильной пространственной ориентации, сглаживались с помощью фильтра Вохсаг и манипуляций с гистограммой амплитуды эхо-сигнала. На данных РЛИ основной фронт плюма принимался за проявление области, где регистрировалась нитевидная чаще светлая, а реже – темная полоса в поле обратного рассеяния радиолокационного сигнала [3]. Дополнительно для определения положения внешней границы плюма реки Иоканга предпринята попытка использовать готовый алгоритм Oil Spill Detection (OSP) [4], основанный на анализе областей затухания гравитационно-капиллярной компоненты поверхностного волнения.

По данным оптических изображений удалось проанализировать сезонную динамику внешней границы плюма реки Иоканга. Так, в период с марта по апрель основной фронт располагается вблизи устья реки, затем в период половодья в мае и начале июня речные воды накапливаются в Святоносском заливе, достигая м. Святой Нос. В конце июня граница плюма регистрируется восточнее полуострова Святой Нос ближе к горлу Белого моря. Период июля-августа характеризуется значительной меридиональной изменчивостью границы, которая располагается в зоне баренцевоморских и беломорских вод и, вероятно, связана с воздействием на тонкий опресненный слой ветровой и приливной динамики. Средняя площадь речного плюма р. Иоканга по оптическим данным менялась от 15 км² в марте до 115 км² в августе, достигая максимума 340 км² в июне в период половодья. Стоит также отметить, что в августе отмечается смешение накопленных в Святоносском заливе опресненных речных вод и морских вод Баренцева моря за счет вихревых

структур, перемещающихся в область плюма из открытой части моря и проявляющихся за счет цветения фитопланктона в этот период.

Анализ данных радиолокации также позволил выделить внешнюю границу речного плюма, которая чаще всего проявлялась в конце мая и начале июня в период половодья. В большинство дней марта-апреля сильные ветра (>10 м/с) ранней весны и в отдельные дни июля-августа слабые летние бризы (<5 м/с) не позволяли регистрировать основной фронт плюма реки Иоканга по данным РЛИ. При этом в июне-августе граница плюма по данным РЛИ чаще наблюдалась западнее полуострова Святой Нос, а по данным оптического диапазона — восточнее, ближе к горлу Белого моря, что может быть связано с колебаниями приливного цикла в данном регионе. Использование алгоритма OSP показало возможность его применения для детектирования границы речного плюма только на отдельных радиолокационных изображениях.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН FMWE-2024-0028.

Список литературы

- 1) Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость. / В.К. Ожигин, [и др.]. Мурманск: ПИНРО, 2016. 260 с.
- 2) Osadchiev A., Alfimenkov I., Rogozhin V. Influence of the Coriolis Force on Spreading of River Plumes // Remote Sensing, 2023. – V. 15. – 3397. <https://doi.org/10.3390/rs15133397>
- 3) Hessner K., Rubino A., Brandt P., Alpers W. The Rhine Outflow Plume Studied by the Analysis of Synthetic Aperture Radar Data and Numerical Simulations // Journal of Physical Oceanography, 2001. – V. 31. – No. 10. – P. 3030–3044. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2001\)0312.0.co](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2001)0312.0.co);
- 4) Brekke C., Solberg A.H.S. Oil spill detection by satellite remote sensing // Remote Sensing of Environment, 2004. – V. 95. – No. 1. – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.015>

СТРУКТУРА ПОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Копышов И.О.^{1,2}, Козлов И.Е.¹, Новиков Б.А.¹, Ширыборова А.И.³

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, поверхностные проявления, дистанционные методы регистрации, пролив Карские Ворота

В настоящей работе представлены результаты идентификации поверхностных проявлений (ПП) короткопериодных внутренних волн (КВВ) на снимках радара с синтезированной апертурой (РСА) Sentinel-1 в проливе Карские Ворота в августе-сентябре 2021 г. На 47 снимках было обнаружено 44 ПП пакетов КВВ. Рассмотрены особенности генерации и распространения КВВ, приведены статистические данные о встречаемости, направлении распространения и пространственных характеристиках пакетов в исследуемом районе. Большинство пакетов КВВ были зарегистрированы у входа в пролив, а также в центральной глубоководной части. Чаще всего скопления КВВ обнаруживались вблизи ярко выраженных неоднородностей рельефа дна, где амплитуды приливной скорости демонстрировали относительно высокие значения, достигающие до 1 м/с. В таких областях колебания могут генерироваться фоновым течением, которое претерпевает изменение за счёт интенсивного приливного течения. Интересным фактом является то, что при определенном соотношении интенсивности среднего потока, приливного течения, фазовой скорости внутренней волны, а также ориентации приливного эллипса образуется не одна “разрешенная зона”, где наблюдается сверхкритический режим течения, а сразу 2. Это означает, что генерация пакетов КВВ будет происходить не один раз за полусуточный период прилива, а, по крайней мере, дважды. Кроме того, приливная гармоника М2 является доминирующей, но не единственной в исследуемой области. Когда накладываются дополнительные эллипсы других гармоник, результирующая скорость прилива может изменяться довольно сложным образом как в течение полусуточного периода, так и в течение сизигийно-квадратурного цикла. Это может привести к увеличению числа “разрешенных зон” генерации КВВ на протяжении приливного цикла, что приведёт к кратному увеличению числа ПП внутренних волн на РЛИ, что и наблюдается в отдельных частях пролива.

В течение двух месяцев наблюдений спутниковые снимки охватывали почти все фазы сизигийно-квадратурного приливного цикла. Использование подробной топографии исследуемого района позволило идентифицировать определенные регионы с более частым присутствием ведущих гребней КВВ, при этом особое внимание было уделено мелководной (< 100 м) части пролива. Затем каждая идентифицированная область описывалась в терминах общей глубины, безразмерного уклона, амплитуд скорости приливного течения и параметров КВВ. В ходе такого анализа акватория пролива над глубинами менее 100 м была разделена на 3 района со своими гидрологическими и приливными особенностями, которые прямым образом влияют на генерацию и распространение КВВ.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0017

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА

Копышов И.О.^{1,2}, Козлов И.Е.¹, Свергун Е.И.³, Зимин А.В.³

¹Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

²Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный

³Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: короткопериодные внутренние волны, запрятственный механизмы генерации внутренних волн, транскритический режим потока, пролив Карские Ворота

Многие авторы отмечали пролив Карские Ворота «горячей точкой» на поле районов генерации пакетов короткопериодных внутренних волн (КВВ), проводя идентификацию поверхностных проявлений радиолокационных изображений на акватории Карского и Баренцева морей [1, 2]. Однако до сих пор экспедиционные исследования, направленные на изучение волновых процессов в водной толще, в данном районе затрагивали лишь отдельные части пролива [3]. Предполагается, что КВВ здесь генерируются вследствие натекания внутреннего прилива (ВП) на топографические неоднородности пролива, тем самым иллюстрируя механизм генерации КВВ за счёт эволюции ВП. В данной работе мы хотели бы расширить представление о механизмах генерации КВВ в проливе Карские Ворота, рассмотрев генерацию подветренным и резонансным способами, которые напрямую связаны не с бароклинным приливом, а с внутренним баротропным приливом, который модулирует фоновое течение, переводя его из докритического в сверхкритическое, а образование волн происходит в момент нахождения потока в транскритическом режиме [5].

Рассмотрение механизмов генерации КВВ, не связанных с прямой эволюцией ВП может быть чрезвычайно важно в бассейнах арктических морей. В высоких широтах важным фактором является наличие критической широты (74.5 с.ш.), вблизи которой распространяющаяся бароклиновая структура M_2 прилива будет неустойчивой, что приводит к тому, что ВП практически не будет распространяться и обрушение будет происходить в момент его генерации, тем самым объединяя очаги генерации ВП и КВВ. Параллельно с этим, анализ спутниковых изображений показывает, что поверхностные проявления КВВ регистрируются в большом количестве в арктических морях и Северном Ледовитом океане. Из последнего может следовать либо большое число очагов генерации ВП, предполагая эволюционный механизм генерации, либо малое число очагов генерации ВП в предположении, что КВВ могут иметь другой генезис, не связанный с бароклинным приливом.

Нашу теорию в проливе Карские Ворота мы строим, основываясь на анализе экспедиционных данных, полученных в ходе рейсов "Плавучего университета" в августе 2021 г. и июле 2023 г. Оба натуральных эксперимента проводились в сизигию, что позволило нам наблюдать более выраженные колебания изотермических поверхностей. Измерения проводились синхронно разнесёнными в пространстве термодатчиками и учащённым СТД-зондированием с периодом не более 5 мин. Также проводилась съёмка морской поверхности с БПЛА в оптическом диапазоне, регистрируя поверхностные проявления проходящих интенсивных колебаний. Более 70% площади пролива занимают 2 мелководных района (< 100 м), разделённые центральной впадиной, с глубиной более 200 м [4], при этом регистрируемые нами КВВ наблюдались как на малых, так и на больших глубинах. В северо-западной мелководной части пролива пакеты КВВ распространялись в сторону Баренцева моря, в северо-восточной части – в сторону Карского моря. На протяжении всего глубоководного района в 2021 г. были зарегистрированы волны, распространяющиеся в сторону Карского моря, при этом анализ РЛИ показывает и обратное направление. Последнее мы связываем с генерацией КВВ в разные фазы прилива. Однако согласно анализу спутниковых снимков [4], в северной части пролива направление распространения пакетов в разные фазы прилива остаётся в пределах одной полуплоскости, что можно объяснить другим механизмом генерации колебаний. Стоит также

обратить внимание на то, что в мелководных районах присутствует большое число топографических неоднородностей, поэтому совокупность интенсивного приливного течения магнитудой до 1 м/с, сложной топографии и наличие постоянного фонового течения из Баренцева в Карское море приводит к образованию нелинейных внутренних волн запрятственный механизм генерации в мелководных районах пролива.

Экспедиционные данные были получены из глубоководных и мелководных частей Карских Ворот, что позволяет нам рассуждать о картине генерации КВВ в целом. Однако, наши выводы корректны более для центральной и южной частей пролива, поскольку в северной части, на расстоянии не более 10 км от Новой Земли, присутствует обратное более холодное течение из Карского моря, омывая южную оконечность архипелага, внося сильные изменение в гидрологический фон.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2024-0017, экспедиционные данные были получены в рамках программы "Плавучие университеты" (соглашение № 075-01593-23-06).

Список литературы

- 1) Kozlov, I., Kudryavtsev, V., Zubkova, E.V., Zimin, A.V. & Chapron, B. (2015). Characteristics of short-period internal waves in the Kara Sea. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 51, 1073–1087. <https://doi.org/10.1134/S0001433815090121>
- 2) Svergun, E. I., Zimin, A. V., Atadzhanova, O. A., Konik, A. A., Zubkova, E. V., & Kozlov, I. E. (2018). Variability of frontal zones and short-period internal waves in the Barents and Kara Seas from satellite observations during the warm period of 2007. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 15(4), 181 – 188. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-181-188>
- 3) Morozov, E. G. (2018). *Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. A Global View*, Springer, Switzerland.
- 4) Kopyshov I.O., Kozlov I.E., Shiryborova A.I., Myslenkov S.A. (2023). Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data. *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, ES0210, <https://doi.org/10.2205/2023ES02SI10>
- 5) Maxworthy, T. (1979). A note on the internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C1), 338-346.

ФОРМИРОВАНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ГРАДИЕНТНЫХ ЗОН В УСТЬЕВОЙ ОБЛАСТИ Р. ПРЕГОЛЯ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ ЧАСТЬ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ)

Коробченкова К.Д.^{1,2}, Кречик В.А.¹, Ульянова М.О.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: устьевая область р. Преголя, градиентная зона, оптимальный мультипараметрический анализ, реанализ, ветровое воздействие.

Устьевая область р. Преголя, образованная ее частью в нижнем течении, глубоким антропогенным Калининградским морским каналом (КМК), мелководным Калининградским (Вислинским) заливом и прибрежной частью Балтийского моря, является зоной взаимодействия пресных, солоноватых и соленых вод. Перемешивание трех типов воды происходит по всей длине КМК с образованием фронтальных зон, положение которых меняется от сезона к сезону в зависимости от постоянно действующих климатических факторов. При отсутствии приливов ветер является основной движущей силой течений, водообмена и перемешивания в канале. Наличие градиентных зон способствует преобразованию рассеянного осадочного вещества и биогенных элементов, что снижает антропогенную нагрузку на значительно эвтрофицированное Балтийское море.

В работе рассматривались сезонные особенности формирования и трансформации градиентных зон в устьевой области р. Преголя. В основе исследования лежат натурные данные, дополненные информацией реанализа ERA5 (зональная и меридиональная компоненты ветра с частотой 1 час) и метеоданными (скорость и направление ветра) со станции г. Балтийск. Все съемки выполнены в характерных для сезона метеорологических условиях. Измерения вертикального распределения температуры и солености выполнялись в 5 экспедициях 20 мая, 6 августа, 27 октября, 28 ноября, 13 декабря 2020 г. на станциях, расположенных в КМК от устья р. Преголи до прибрежной акватории Балтийского моря. Работы проводились зондами Sea&Sun Tech CTD90M и SonTek CastAway. Процентные соотношения трех типов воды (вода реки, вода залива и морская вода) в КМК были рассчитаны методом оптимального мультипараметрического анализа с использованием библиотеки PYOMPA для Python.

Осенью и зимой 2020 г. над регионом установились сильные ветры южного, юго-западного и западного направления, что способствовало затоку морских вод через Балтийский пролив и дальнейшему их распространению в канале. Максимальные скорости ветра характерны для зимы (до 19 м/с). В теплое время года среднее значение скорости ветра (3 м/с) было ниже по сравнению с осенью и зимой (5 м/с). Весной увеличилась повторяемость ветров северного направления, доминирующего в этом сезоне, и часто отмечались ветры западных румбов. Ветер северного направления и увеличивающийся речной сток способствовали выносу пресных вод в море, в то же время высокая повторяемость ветра западных румбов формировала условия для затока морской воды в канал. Лето характеризовалось минимальными скоростями ветра, снижением повторяемости северного ветра и увеличением частоты ветра западного и восточного направлений.

Осенью от устья реки до прибрежной части прослеживались два относительно постоянных фронта, выраженных в распределении температуры и солености. В первой зоне происходило интенсивное взаимодействие перемешанных вод КМК (50 % морской воды и 50 % воды залива) с водой прибрежной акватории моря в Балтийском проливе. Вторая градиентная зона сформировалась над клином морской воды (более соленой и теплой) и отделяла поверхностные воды в КМК (более холодные и пресные) (25 % морской воды и 75% воды залива) от придонных вод в КМК (75 % морской воды и 25% воды залива). Вынос более холодных и пресных вод в устье р. Преголи сформировал область выраженной стратификации.

Зимой наблюдалось интенсивное развитие процессов атмосферного выхолаживания. В устьевой зоне реки отмечались минимальная температура и максимальная соленость. Адвекция морских теплых и солёных вод и приток холодной воды из Калининградского залива создавали в канале (от середины канала до Балтийского пролива) выраженную стратификацию от поверхности до дна (в поверхностном слое 55–100% воды залива и 0–45% морской воды; в придонном слое 35–75% воды залива и 25–65% морской воды). В устьевой части реки наблюдалась стратификация, связанная со стоком реки. Квазистационарный фронт, возникший при водообмене между морем и заливом, хорошо прослеживался в районе Балтийского пролива и прибрежной части (25% воды залива и 75% морской воды).

В конце весны под действием атмосферного прогрева увеличилась температура воды и в КМК установилась двухслойная термическая стратификация. Вынос из канала в море сформировал в поверхностном слое (7–12 м) зону теплой воды. После половодья в начале весны и снижения солености до минимальных годовых значений на протяжении всего канала, в мае на фоне снижения стока наблюдалось увеличение солености. Язык морской воды проникал до середины канала (в поверхностном слое 50–100% воды залива и 0–50% морской воды; в придонном слое 25–75% воды залива и 25–75% морской воды). Плюм в прибрежной зоне Балтийского моря трансформировался в обширную зону более пресных вод (35% воды залива и 65% морской воды), нижняя граница которой совпадала со слоем вертикального градиента температуры.

Летом вода прогревалась до максимальных значений и была термически однородна в канале. Стратификация определялась в основном соленостью, значения которой возрастали относительно весны. Водообмен через Балтийский пролив выражался возникновением зоны значительной стратификации западнее и восточнее пролива и в распространении плюма вод КМК (около 85 % морской воды и около 15 % воды залива) на расстояние около 10 км от пролива в море. Вторая зона выраженной стратификации формировалась в восточной части КМК под влиянием выноса речной воды и отделяла поверхностные более пресные воды (от 100 до 65% речной воды и до 35% воды залива) от более соленых придонных вод (примерно 50% речной воды и около 50-75% воды залива). Зона со слабой стратификацией сформировалась в западной части КМК и районе Приморской бухты. Доля воды залива здесь в поверхностном слое составляла 85–100%, доля морской воды до 15%. В придонном слое объем воды залива снижался, доля морской воды увеличивался до 25–50%.

Таким образом, устьевая область р. Преголя представляет собой сложную гидродинамическую систему со значительной изменчивостью от стратифицированной до хорошо перемешанной по вертикали водной толщии как вдоль зоны от реки к морю, так и от сезона к сезону. Постоянное присутствие в канале морских и речных вод и солоноватой воды залива обеспечивало формирование квазистационарных градиентных зон, изменяющих свое положение и интенсивность в зависимости от преобладающих метеорологических условий.

Анализ метеорологических условий был поддержан из средств программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» БФУ им. И. Канта, научный проект № 122110200031-7. Гидрологические исследования выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

СЕЗОННАЯ И СИНОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛЮМОВ МАЛЫХ РЕК СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ

Коршенко Е.А.¹, Панасенкова И.И.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{3,4}, Белякова П.А.⁵, Фомин В.В.^{1,2,6}

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, Москва

³Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

⁴Московский физико-технический институт, Долгопрудный

⁵Институт водных проблем РАН, Москва

⁶Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, Москва

Ключевые слова: речной плюм, атмосферное воздействие, дождевой паводок, весеннее половодье, прибрежная циркуляция, качество вод, Черное море.

Многочисленные малые реки впадают в Черное море в его северо-восточной части и формируют небольшие речные плюмы. Во время весеннего половодья и частых дождевых паводков эти плюмы резко увеличиваются в размерах и часто сливаются в единую вдольбереговую опресненную полосу. В эти периоды происходит перестройка прибрежной циркуляции, что влияет на перенос взвешенных и растворенных веществ речного происхождения, а также плавучего мусора. Частота и продолжительность таких периодов в полноводные и маловодные годы очень отличаются, что приводит к различиям, как в процессах распространения и перемешивания плюмов, так и в региональной циркуляции.

С помощью численного моделирования восстанавливалось распространение плюмов от 9 малых рек (Псезуапсе, Шахе, Сочи, Мзымта, Куапсе, Западный Дагомыс, Хоста, Мацеста, Кудепста) в северо-восточной части Черного моря в течение маловодного 2020 года и полноводного 2021 года. На основе полученных данных была изучена синоптическая и межгодовая изменчивость малых речных плюмов.

Для расчета термогидродинамических характеристик использовалась региональная версия трехмерной σ -модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1], со сгущением сеточной области до 200 м в районе Сочи [2]. Атмосферное воздействие рассчитывалось с помощью атмосферной региональной негидростатической модели WRF (Weather Research and Forecasting Model) [3], реализованной в ФГБУ «ГОИН». Среднесуточные расходы пресной воды малых рек Мзымта и Сочи восстанавливались по срочным расходам Гидрометслужбы России (<https://gmvo.skniivh.ru/>), а для остальных малых рек – по среднесуточным уровням Автоматизированной системы мониторинга паводков Краснодарского края ЭМЕРСИТ (<http://www.emercit.com>). Дополнительно исследовалась необходимость использования часовых расходов рек вместо суточных. Для этого были получены часовые расходы малых рек на периоды двух интенсивных июльских паводков 2021 г. (4-6 и 22-24 июля). Для части рек расходы были предоставлены Сочинским ЦГМС ЧАМ (<https://www.pogodasochi.ru/>). Расходы других рек оценивались по модели KW-GIUN (модель геоморфологического мгновенного единичного гидрографа) [4]. Для расчета времени обновления воды в плюмах рек Мзымта и Сочи и выброса речных частиц на берег использовался программный комплекс OpenDrift (<https://github.com/OpenDrift/opendrift/>) [5]. Для расчета площади плюмов рек Мзымта и Сочи использовался метод кластерного анализа KMeans (Python).

Согласно полученным результатам, на общие картины сезонных полей поверхностной солёности и на сезонную изменчивость суммарной площади плюмов рек Мзымта и Сочи для маловодного 2020 года и полноводного 2021 года влияет период возникновения, количество, длительность и интенсивность паводков, то есть отличие в значениях стока и преобладающих значениях направления и магнитуды ветра. При преобладающем ЮВ-В-СВ ветре с амплитудой до 10 м/с значения

стока рек соизмеримо влияют на значения сезонной площади их плюмов. При уменьшении амплитуды ветра и смене генерального направления ветра в весенне-летний сезон зависимость сезонной площади от расхода рек уменьшается и можно предположить, что при частой смене ветра возрастает влияние ветра на площади плюмов, как в большую, так и в меньшую сторону. То же можно сказать и про осень, когда возвращается ЮВ-В-СВ ветер, но с продолжающейся сменой ветра. Плюмы рек Мзымта и Сочи под действием частой смены ветра чаще концентрируются у устьев рек или наоборот распространяются в мористую часть моря, что влияет на площадь плюмов. Время обновления воды в плюмах очень зависит от длительности, интенсивности и направления ветра за период паводков и в рамках проведенного исследования, даже при самых благоприятных условиях, редко превосходило 6 часов.

Для образования полосы вдоль северо-восточного побережья есть несколько благоприятных факторов образования: ЮВ ветер с амплитудой около 10 м/с без резкой смены направления в течение суток, высокие пики паводков (больше 30 м³/с, кроме периода межени) или большой суммарный расход.

Количество частиц, выброшенных на берег за период паводков, напрямую зависит от длительности, интенсивности паводка, динамики ветра и Стоксова дрейфа. При В-ЮВ-Ю ветре и достаточной магнитуде (~10 м/с) частицы, по большей части, выбрасываются на берег северо-западнее от устьев рек. При З-СЗ-С ветре, они, наоборот, попадают на берег юго-восточнее от устьев рек.

Работа выполнена в рамках плана НИОКТР тема № АААА-А20-120042190045-6 (Развитие моделей, методов и технологий мониторинга гидрохимического состояния и загрязнения морей России и оценки гидрологического и гидрохимического состояния морей и морских устьев рек).

Список литературы

- 1) Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на коротко-периодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
- 2) Korshenko E.A., Panasenkova I.I., Osadchiev A.A., Belyakova P.A., Fomin V.V. Synoptic and Seasonal Variability of Small River Plumes in the Northeastern Part of the Black Sea // *Water*, 2023. – V. 15. – 721. DOI: 10.3390/w15040721.
- 3) Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y., 2019: A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp. – DOI: 10.5065/1dfh-6p97.
- 4) Lee K.T., Yen B.C. Geomorphology and Kinematic-Wave-Based Hydrograph Derivation // *J. Hydraul. Eng.*, 1997. – V. 123. – P. 73–80. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:1(73).
- 5) Dagestad K.-F., Röhrs J., Breivik Ø., Ådlandsvik B. Opendrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling // *Geoscientific Model Development*, 2018. – V. 11. – P. 1405-1420, 10.5194/gmd-11-1405-2018.

КОГЕРЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ: ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ НАД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКОЙ

Кошкина В.С.^{1,2}, Гавриков А.В.²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: когерентные структуры, мезомасштабная метеорология, идентификация вихрей, отслеживание траекторий, численное моделирование

К мезомасштабным атмосферным явлениям относятся процессы с пространственными размерами от 10 до 1000 км и временными масштабами от часов до первых нескольких суток. К мезомасштабным относятся процессы различных типов от ливневых осадков и торнадо до тропических циклонов. Хорошо видно, что процессы этого масштаба часто бывают связаны с экстремальными погодными явлениями. Традиционно, изучение динамических характеристик мезомасштабных вихрей и основано на численном моделировании отдельных случаев. Однако, это не позволяет получить общую статистическую картину: где явления чаще всего локализованы, к какому типу они относятся, существуют ли значимые территориальные отличия и климатические тренды того или иного типа мезомасштабного процесса. Эта информация позволила бы обобщить каждый тип и выявить статистически значимые характеристики их динамики, а также условий возникновения/затухания.

Мезомасштабные процессы чаще всего рассматриваются как когерентные структуры (КС), то есть структуры, сохраняющие свои свойства в пространстве и развивающиеся во времени. В геофизике такие структуры преимущественно соответствуют вихревым образованиям и играют важнейшую роль в динамике как атмосферы, так и океана. Для получения достоверной статистической картины необходимы инвариантные критерии вихря, обеспечивающие его объективную идентификацию. Предлагается использовать основанный на принципах турбулентной гидродинамики подход Эйлера для определения вихревых когерентных структур в данных численного моделирования атмосферы.

В работе [1] была исследована применимость Q , Δ и λ_2 -критериев для идентификации КС в данных численного моделирования различного разрешения и было показано, что эти методы страдают от необходимости выбора эмпирического порогового значения и невозможности определения направления вращения. В настоящем исследовании представлено использование более современного метода идентификации вихрей - Rortex-критерия [2]. Этот метод лишен вышеописанных недостатков и хорошо себя показал в применении к сравнительно грубому разрешению результатов численного моделирования. Rortex-критерий применялся к данным об атмосфере - региональному высокоразрешающему историческому атмосферному прогнозу над Северной Атлантикой NAAD (North Atlantic Atmospheric Downscaling) [3], созданному в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

В результате были разработаны методы для выделения КС, определения их границ с помощью метода DBSCAN [4], автоматического отслеживания и построения траекторий вихрей. Этот инструментарий позволил получить характеристики каждого вихря на протяжении его жизненного цикла, что, среди прочего, открыло возможность увидеть картину плотности количеств циклонических и антициклонических мезомасштабных структур и (на основе внутренних термодинамических характеристик) провести предварительную кластеризацию типов вихрей. Полученные данные позволяют оценить частоту возникновения, климатологию и межгодовую изменчивость мезомасштабных процессов в Северной Атлантике. В работе представлены результаты для североатлантического региона за 2010 год.

Работа выполнена в рамках проекта РФФ 24-27-00404.

Список литературы

- 1) Koshkina V., Gavrikov A., Krinitskiy M. Methods of Identification Coherent Structures in Atmospheric Numerical Data // Environmental Sciences Proceedings, 2023. – Т. 26. – №. 1. – С. 198.
- 2) Liu C. et al. Rortex—A new vortex vector definition and vorticity tensor and vector decompositions // Physics of Fluids, 2018. – Т. 30. – №. 3.
- 3) Gavrikov A., Gulev S.K., Markina M., Tilinina N., Verezemskaya P., Barnier B., Dufour A., Zolina O., Zyulyaeva Y., Krinitskiy M., Okhlopkov I., Sokov A. RAS-NAAD: 40-yr HighResolution North Atlantic Atmospheric Hindcast for Multipurpose Applications (New Dataset for the Regional Mesoscale Studies in the Atmosphere and the Ocean) // Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2020. – 59(5). – P. 793–817. ISSN 1558-8424. doi: 10.1175/jamc-d-19-0190.1
- 4) Schubert E. et al. DBSCAN revisited, revisited: why and how you should (still) use DBSCAN // ACM Transactions on Database Systems (TODS), 2017. – Т. 42. – №. 3. – С. 1–21.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НОВОЗЕМЕЛЬСКОЙ БОРЫ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кошкина В.С.^{1,2}, Гавриков А.В.²

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: новоземельская бора, подветренные бури, мезомасштабные процессы, автоматическая идентификация аномалий, климатология, Арктика, численное моделирование.

Для архипелага Новая Земля (НЗ) со стороны Баренцева моря характерно возникновение сильного холодного ветра. Этот ветер формируется над холодным Карским морем, а затем, преодолевая горный хребет, выходит на относительно более теплое Баренцево море. Таким образом, архипелаг Новая Земля подвержен влиянию боры - интенсивному, холодному и порывистому ветру, дующему на поверхность моря с прибрежных склонов гор и нередко достигающему ураганной силы. Бора – это мезомасштабное явление, относящееся к подветренным бурям - экстремальным и разрушительным погодным явлениям, возникающим при переваливании крупномасштабными воздушными потоками горных препятствий. Подобные явления характерны для многих районов земного шара [1] (новороссийская и адриатическая бора, южак в Певеке, мистраль во Франции и т.д.). Подветренные бури часто представляют серьезную опасность для прибрежной инфраструктуры и нередко вызывают человеческие жертвы и значительный экономический ущерб. Аномально сильный ветер (25-30 м/с), возникающий при соблюдении определенных условий над западным подветренным склоном гор в Баренцевом море, способен приводить к существенным разрушениям, обледенению судов и станций. Это обстоятельство особенно важно для навигации Северного морского пути.

Исследования мезомасштабных экстремальных погодных явлений, их динамических и физических характеристик, а также условий их формирования, основано на высокоразрешающем моделировании атмосферы и/или океана. Нередко для анализа также используются данные контактных и дистанционных наблюдений [2, 6]. Так, большинство работ, посвященных новоземельской боре, носят характер «case-studies», когда производится высокоразрешающее численное моделирование конкретного события аномального ветра [3, 6]. Однако, такой подход не позволяет оценить вклад экстремальных явлений в общую динамику атмосферы, а также их роль в климатических процессах.

Будучи мезомасштабным процессом, бора неудовлетворительно прогнозируется глобальными моделями (в том числе реанализами), ввиду разрешения этих моделей и заложенной в них динамики. Таким образом, с практической точки зрения значительный интерес представляет возможность заблаговременного прогноза экстремального явления. Чтобы реализовать прогноз новоземельской боры, необходимо решить ряд фундаментальных научных задач:

- определить общих принципов для автоматического выделения бор в данных численного моделирования;
- по результатами идентификации получить статистику появления новоземельских бор;
- выяснить условия их возникновения, механизмы развития и затухания.

Целью данной работы является построение общей системы идентификации событий аномального ветра над Баренцевым морем (боры), а также определение основных факторов ее формирования. Для анализа использованы данные моделирования WRF [4] с пространственным разрешением 6 км. Первичный анализ проводился на основе полей приземной температуры на 2 м, а также полей скорости на высоте 10 метров над уровнем моря. Вследствие большой протяженности архипелага идентификация проводилась для трех районов к западу от Новой Земли. Для идентификации новоземельской боры был выбран ряд критериев, основанных на отношении скоростей

ветра в Баренцевом и Карском морях, а также учете направления ветра (со стороны Карского моря в сторону Баренцева). Это позволяет не учитывать ситуации, которые приводят к похожему эффекту, но борой не являются.

Многие авторы в качестве механизмов возникновения бор выделяют волновую теорию (включая обрушение волн) и теорию гидравлического скачка, однако до сих пор отсутствует общепринятое понимание ее формирования [5]. Кроме того, не исключается взаимодействие всех механизмов. На основе сформулированного подхода был произведен расчет статистики явлений боры за многолетний период. Дальнейший индивидуальный и статистический анализ двумерных и трехмерных полей различных метеопараметров позволяет кластеризовать типы бор, соответствующих различным характеристикам, а также определить факторы, влияющие на механизм возникновения.

Работа выполнена в рамках госзадания № FMWE-2022-0002.

Список литературы

- 1) Grisogono B., Belušić D. A review of recent advances in understanding the meso-and microscale properties of the severe Bora wind // *Tellus A*. 2009. V. 61, № 1. P. 1–16.
- 2) Гавриков А.В., Иванов А.Ю. Аномально сильная бора на Черном море: наблюдение из космоса и численное моделирование // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2015. Т. 51, № 5. С. 615–615.
- 3) Ефимов В.В., Комаровская О.И. Новоземельская бора: анализ и численное моделирование // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54, № 1. С. 83–96.
- 4) Skamarock W.C. et al. A description of the advanced research WRF version 4 // *NCAR tech. note ncar/tn-556+ str.* 2019. V. 145.
- 5) Беданок М.К. и др. Обзор работ, посвященных моделированию явлений обтекания неровностей поверхности земли и катастрофических ветров типа боры // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2018. № 3. С. 15–39.
- 6) Шестакова А.А. Новоземельская бора: подветренные характеристики и структура натекающего потока // *Арктика и Антарктика*. 2016. № 2. С. 86–98.

ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД МОРЕМ

Крайнова М.С.¹, Булгаков К.Ю.², Багно С.С.¹

¹Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт Океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: бароклинность, вихрь скорости

Циклоны и антициклоны являются основными элементами атмосферы и оказывают значительное влияние на её погодные условия. Одним из факторов, влияющих на их развитие и эволюцию является бароклинная среда, в которой изобары и изопикны не параллельны. Такая ситуация может возникать при прохождении синоптических вихрей над океанской поверхностью.

В данной работе предлагается упрощённая модель для качественного воспроизведения движения синоптических вихрей над морем, приводятся результаты экспериментов, проведённых с данной моделью.

В исследование была использована численная модель, основанная на следующих уравнениях:

1. Уравнение эволюции относительного вихря скорости, описывающее двумерное движение относительного вихря скорости под действием адвекции, бароклинного фактора и бетта – эффекта.
2. Адвекция вихря скорости и бароклинность сформулирована с помощью якобиана.
3. Поле функции тока рассчитывается через уравнение Пуассона.
4. Давление определяется исходя из геострофического приближения.
5. Зональная и меридиональная компоненты скорости ветра рассчитываются через функцию тока по известным соотношениям.
6. Изменение плотности воздуха, которое происходит в следствии интенсификации перемешивания морской воды и как следствие этого уменьшение температуры поверхности воды океана, было параметризовано упрощённой формулой.

Интегрирование проводилось на вычислительной сетке, где количество узлов по x – 100, количество узлов по y – 100, шаг по пространству в направлении оси x – 10 км, шаг по пространству в направлении оси y – 10 км. Величина шага по времени $\Delta t=50$ секунд выбиралась исходя из условия Куранта-Фридрихса-Леви с учетом максимально возможной скорости 50 м/с. На боковых границах задавалось условие периодичности.

Бетта – параметр задавался исходя из того, что южная граница области соответствовала широте примерно 40° , а северная граница широте приблизительно 49° .

Для решения дифференциальных уравнений был применён метод конечно-разностных аналогов. Аппроксимация якобианов была реализована при помощи метода Аракавой [1].

Для подавления неустойчивости в модели был использован фильтр скользящего среднего. Данный фильтр используется для сглаживания данных. Он вычисляет среднее значение путём усреднения значений вокруг текущей ячейки.

Производная по времени была аппроксимирована следующим образом: первый шаг рассчитывался по схеме Эйлера первого порядка точности. Последующие шаги рассчитывались с применением трехуровневых схем второго порядка – схемы «чехарды» и схемы Адамса-Башфорта. Для решения уравнения Пуассона был использован метод верхней релаксации.

В ходе исследования было проведено 2 серии экспериментов. В течение каждого из них поле плотности сдвигалось на 1 ячейку вправо через каждые 10 шагов, значение плотности на левой границе всегда равнялось 1.3 кг/м^3 . Таким образом воспроизводилось перемещение области интегрирования (и барического образования внутри неё) с востока на запад со скоростью 10 м/с (36 км/ч) относительно неподвижного поля плотности.

В качестве начальных условий в первой серии задавался циклон, со следующими параметрами: максимальная скорость: $14,9 \text{ [м/с]}$, максимальное абсолютное значения вихря: $1,046 \times 10^3 \text{ [1/с]}$,

диаметр вихря: 150 [км], разница давлений между центром и последней замкнутой изобарой - 5 [гПа].

Для второй серии экспериментов задавался антициклон с аналогичными характеристиками.

Каждая серия состояла из двух экспериментов. В первом эксперименте каждой из серий бароклиный фактор рассчитывался якобианом Аракавы, во втором бароклиный фактор задавался равным нулю. Интегрирование проводилось на срок 168 часов (что соответствует неделе).

Результаты первой серии эксперимента показали, что при включении бароклиности из основных характеристик циклона изменилась только максимальная скорость, которая в циклоне с учетом бароклиного фактора стала больше. Глубина рассматриваемого барического образования (разница между давлением в центре и на последней замкнутой изобаре) и величина вихря скорости существенных изменений не претерпели.

При проведении второго эксперимента было выявлено, что циклон с учетом бароклиного фактора сместился на север относительно циклона без учета бароклиности.

Характеристики антициклонов с учетом бароклиного фактора и без него не претерпели существенных изменений в ходе второй серии экспериментов. Действие бароклиного фактора выражается в смещении антициклона на север, при этом смещение антициклона оказалось сильнее, чем циклона.

Полученные результаты показывают, что уменьшение температуры поверхности океана, вызываемое прохождением синоптического вихря, оказывает влияние на эволюцию этого синоптического образования через бароклиный фактор. Циклон и антициклон вследствие действия этого фактора смещаются на север относительно циклонов и антициклонов, которые эволюционировали без действия данного фактора. Также в циклоне наблюдалось увеличение скорости. Таким образом можно говорить о том, что обратная связь в данной системе существует, и она положительна.

Предложенный подход позволяет провести только качественную оценку, поэтому дальнейшее исследование обратной связи, возникающей между синоптическим вихрем и верхним слоем океана необходимо проводить с помощью моделей совместной циркуляции океана и атмосферы.

Результаты исследований выполнены в рамках гос. задания FMWE-2024-0028.

Список литературы

- 1) Мезингер Ф., Аракава А. Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Гидрометеоздат, 1979, С. 79–88.

ОЦЕНКА ЗНАЧИМОЙ ВЫСОТЫ ВЕТРОВЫХ ВОЛН ПО ДАННЫМ СУДОВОГО НАВИГАЦИОННОГО РАДАРА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Криницкий М.А.^{1,2}, Голиков В.А.^{1,2}, Резвов В.Ю.^{1,2}, Гавриков А.В.², Суслов А.И.², Борисов М.А.^{1,2}, Тилинина Н.Д.²,

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: ветровое волнение, морские навигационные радары, искусственные нейронные сети, машинное обучение, значимая высота волнения

Морские навигационные радары играют первостепенное значение для обеспечения безопасного мореплавания, обнаружения. Радарная картина, порождаемая с участием Брэгговского рассеиванием от взволнованной поверхности моря, обычно отфильтровывается как шум, для представления штурману ясной индикации окружающего пространства. Однако на неотфильтрованной картине становятся обнаружимы особенности поверхности моря. Такие снимки могут быть получены с использованием аппаратного комплекса SeaVision, при условии, что скорость ветра и высота волн превышают определённые пороговые значения. Характеристики ветровых океанских волн можно определить, используя эти изображения. Начиная с 1964 года существуют исследования, демонстрирующие эту возможность. Однако традиционные спектральные методы определения характеристик волн сталкиваются с ограничениями при попытках повышении точности. В то же время, методы глубокого обучения имеют преимущества в задачах обработки изображений, будучи более надёжными и способными работать с более шумными данными; при этом выдают результаты без применения преобразований Фурье и без необходимости длинных серий радарных изображений. В нашем докладе мы представляем метод, использующий свёрточные нейронные сети (СНС) для оценки характеристик ветровых волн на основе изображений с судовых навигационных радаров, получаемых с помощью аппаратного комплекса SeaVision. Мы обучаем эту СНС определять значимую высоту волн на основе оценок, предоставленных буем Spotter, принимаемых за референсные значения. Поскольку измерения буем Spotter дорогостоящи и требуют много времени, мы также демонстрируем возможности предварительного обучения СНС, которое улучшает способность к обобщению и общее качество оценки характеристик ветровых волн. Наш метод на основе СНС имеет преимущество перед классическими методами из-за низких требований к данным радиолокационных изображений, поскольку мы обрабатываем только один снимок SeaVision, в то время как классический метод требует более 20 минут радиолокационных изображений.

Исследование выполнено в рамках работ по госзаданию FMWE-2022-0002; разработка и реализация подхода предварительного обучения проведена при поддержке в рамках программы ПРИОРИТЕТ-2030.

ОСОБЕННОСТИ ШТОРМОВОГО ВОЛНЕНИЯ В МОРЯХ ВОСТОЧНОГО СЕКТОРА РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ С 1979 ПО 2022 ГОД

Круглова Е.Е.^{1,2}, Мысленков С.А.^{1,2,3}

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

² Институт Океанологии имени П.П. Ширшова, г. Москва

³ Гидрометеорологический научноисследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

Ключевые слова: ветровое волнение, моделирование ветровых волн, WAVEWATCHIII, восточный сектор российской Арктики, море Лаптевых, Восточно-Сибирское море, Чукотское море.

В настоящее время в Арктике ведется активная хозяйственной деятельность, связанная с разведкой, добычей и транспортировкой полезных ископаемых, рыбным промыслом, судоходством. Активное развитие Северного морского пути позволило увеличить грузооборот за 2023 год до рекордных 36 млн тонн [1]. В связи с изменениями климата меняется и волновой режим Восточной Арктики, что подчеркивает актуальность исследований в этом регионе. В работе [2] показано, что в море Лаптевых, Чукотском море и в море Бофорта есть статистически значимый тренд увеличения высоты волн со скоростью 0.1–0.3 м за 10 лет.

Ранее нашей научной группой был выполнен анализ трендов среднегодовой высоты волн по данным моделирования в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях [3]. Наиболее сильное увеличение среднегодовой высоты волн наблюдается в Восточно-Сибирском море (0.4 до 1.4 м в безледный период). Данная работа является продолжением, с целью проанализировать межгодовую изменчивость штормового волнения и продолжительности штормовых событий.

Для расчета параметров ветрового волнения в море Лаптевых, Чукотском и Восточно-Сибирском морях использовалась спектральная волновая модель третьего поколения WAVEWATCH III версии 6.07. При моделировании данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010 гг.) с пространственным разрешением $\sim 0.3^\circ$ и реанализа NCEP/CFSv2 (2011–2021 гг.) с разрешением $\sim 0.2^\circ$. Вычисления проводились на неструктурной триангуляционной сетке, состоящей из 36176 узлов. Данная сетка покрывает акваторию моря Лаптевых, Чукотского и Восточно-Сибирского морей, а также часть Северного Ледовитого океана. Для прибрежной зоны исследуемых морей шаг сетки составляет около 800 м, а в открытой части около 10–15 км. В работе [3] присутствует оценка качества волновой модели по данным со станции NDBC №48213 и спутника CFOSAT, коэффициент корреляции 0.89–0.95, систематическая ошибка -0.05 м. Оценки качества реанализа и модельных расчетов можно также найти в [2–5]. Выходные данные модели представляют собой характеристики ветрового волнения с дискретностью 3 часа с января 1979 года по декабрь 2021 года. Далее в работе использовалась высота значительных волн H_s .

Для анализа штормового волнения (далее — штормов) использована методика Peak Over Threshold (POT). Применение данной методики можно встретить в работах [4–5]. Ранее эта методика применялась для Баренцева, Карского, Балтийского, Черного и Каспийского морей. Полученные данные о количестве штормов в год на основе многолетней выборки были исследованы на наличие трендов. В качестве тренда выступала модель линейной регрессии. Для проверки на значимость использовались критические значения Стьюдента и Фишера.

По данным моделирования в море Лаптевых в среднем 23 шторма с высотой значительных волн >2 м. и 8 штормов с >3 м. Значимые положительные линейные тренды найдены для штормов с критериями >2 и >3 м. Максимальная величина тренда для штормов >2 м. — 3 шторма/10 лет. Растет также и продолжительность штормов. Для суммарной продолжительности положительный значимый тренд наблюдается для >2 м. (величина тренда 8 суток/10 лет). Для средней продолжительности значимые положительные тренды характерны для штормов с высотами от

>2 до >4 м. (величины трендов от 4 до 2 часов/10 лет соответственно). Для Восточно-Сибирского моря характерно в среднем 23 шторма с высотой волн >2 м. в год, и 9 с высотами >3 м. Значимые положительные тренды по количеству штормов характерны для >2 и >3 м. (величина тренда 4 и 2 шторма/10 лет). Для этих же критериев значимы тренды и по средней продолжительности — каждые 10 лет средняя продолжительность шторма с высотами >2 м. становится больше на 8 часов и на 5 часов для >3 м. Наибольшие изменения в штормовом волнении характерны для Чукотского моря. Среднее количество штормов с высотами >2 метров — 39 в год, а для >3 м — 23. Значимые положительные тренды для количества штормов характерны для штормов всех критериев (от >2 до >5 м.). Максимальная величина тренда для штормов с высотами >2 и >3 м. 2 шторма/10 лет. Для всех же критериев имеются значимые положительные тренды для суммарной продолжительности штормов (максимальный тренд для >2 м. — 2 дня/10 лет), а для средней продолжительности только для >2 м.(с величиной 11 часов/10 лет).

Подводя итог, можно сказать, что именно для Чукотского моря наблюдается увеличение количества не только небольших штормов (с высотами >2 и >3 м.), но и штормов с высотами >4 и >5 м. Здесь же наблюдается максимальная величина тренда для суммарной продолжительности — 2 дня/10 лет. Для моря Лаптевых и Восточно-Сибирского также характерно увеличения длительности штормовых событий и их количества, однако только для небольших высот волн (>2 и >3 м.).

Работа С. А. Мысленкова выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-33. Работа Кругловой Е.Е. подготовлена в рамках выполнения темы №FMWE-2024-0016 государственного задания Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Список литературы

- 1) Объем перевозок по Северному морскому пути достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году. [Электронный ресурс] ТАСС: Экономика: Объем перевозок по Северному морскому пути достиг 36 млн тонн грузов в 2023 году // URL: <https://tass.ru/ekonomika/19682861> (дата обращения 06.01.2023)
- 2) Нестеров Е. С. Ветровое волнение в арктических морях (обзор) // Гидрометеорологические исследования и прогнозы № 3. 2020. С. 19-41.
- 3) Мысленков С. А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы №1. 2023. С. 87-101.
- 4) Myslenkov, S., E. Kruglova, A. Medvedeva, K. Silvestrova, V. Arkhipkin, A. Akpinar and S. Dobrolyubov. Number of Storms in Several Russian Seas: Trends and Connection to Large-Scale Atmospheric Indices // Russian Journal of Earth Sciences №3(23). 2023. ES3002, <https://doi.org/10.2205/2023es000828>
- 5) Kruglova E., Myslenkov S. Influence of Long-Term Wind Variability on the Storm Activity in the Caspian Sea // Water №11(15). 2023. P. 2125.

СУБМЕЗОМАСШТАБНАЯ ДИНАМИКА ЧЕРНОГО МОРЯ ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ И РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кубряков А.А., Алескерова А.А., Лишаев П.Н., Медведева А.В., Пузина О.С., Мизюк
А.И., Станичный С.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Ключевые слова: субмезомасштабные вихри, спутниковые измерения, дроны, БПЛА, пространственно-временная изменчивость, Черное море

На основе спутниковых измерений среднего и высокого разрешения и численного моделирования с высоким разрешением и данных БПЛА исследуется пространственно-временная изменчивость характеристик субмезомасштабных вихрей и механизмы их генерации в Черном море. Наиболее часто такие вихри встречаются в прибрежной зоне, где их образование в основном связано со взаимодействием дрейфовых, крупно- и мезомасштабных течений с особенностями ортографии берега. Особенно интенсивно этот процесс наблюдается при взаимодействии синоптических антициклонов с мысами, что приводит к генерации серии субмезомасштабных циклонических вихрей (СЦВ). Данные численного моделирования показывают, что такие вихри имеют наибольшую скорость и завихренность в начале своего образования, и могут занимать слой вод до 200м. В процессе дальнейшей эволюции в течении времени жизни (до 20 дней) они ослабевают и вытягиваются в вихревую нить и, далее, диссипируют. Образование СЦВ часто наблюдается в прибрежной зоне часто наблюдается при отрыве прибрежных апвеллингов от берега. В этом случае апвеллинг трансформируется в холодный СЦВ, который захватывает прибрежные воды и выносит их на 100-150 км от берега. Процесс аккумуляции взвеси в прибрежных СЦВ связан с конвергенцией вод, возникающей из-за неразрывности жидкости в следствие наличия стенки - берега, которая приводит к закручиванию спирали внутрь СЦВ. Эти вихри перемещаются со скоростью фонового потока (и способствуют быстрому выносу вещества от берега в открытое море). С течением времени концентрации ВВ и хлорофилла А в ядрах субмезомасштабных вихрей уменьшаются из-за ослабления вихрей и их смешения с окружающими водами.

Субмезомасштабные антициклонические вихри (САВ) наблюдается гораздо реже, чем СЦВ. Образование цепочки таких САВ диаметром 400-800м наблюдалось по данным БПЛА при интенсивном оттоке вод из Севастопольской бухты под действием апвеллинга у резкого топографического препятствия - мола. Такие САВ имели орбитальную скорость 0.1 см/с, а их завихренность достигала 50f.

Вдали от берега наиболее интенсивная генерация СЦВ связана с наличием резких градиентов плотности. Интенсивная субмезомасштабная динамика фиксируется в районе впадения крупных рек на северо-западном шельфе Черного моря, где присутствуют резкие вертикальные и горизонтальные перепады солености. При этом в холодный период года, когда шельфовые воды перемещаются до дна, субмезомасштабная динамика в этом районе значительно ослабевает.

Пресные воды шельфа попадают в центральную часть моря в результате их вовлечения синоптическими антициклонами. Районы вовлечения этих вод являются зонами наиболее интенсивной генерации субмезомасштабных вихрей на континентальном склоне. Возникновение бароклинной неустойчивости вызывает генерацию периодических субмезомасштабных структур, среди которых наибольшей завихренностью обладают циклонические вихри. В зимний период в центральной части моря интенсивность субмезомасштабных динамических процессов возрастает. Однако, в это время когерентные вихревые структуры наблюдаются достаточно редко. Одним из важных процессов, которые влияют на интенсификацию вихрей в это время, является неоднородность

выхолаживания, связанная с пространственной изменчивостью скорости ветра и потоков тепла. Такие вихри способствовали усилению горизонтального и вертикального обмена на границе фронта, сопровождающегося диапикническим смещением тяжелых холодных вод центральной части и теплых опреснённых вод на периферии бассейна.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 20-17-00167, анализ спутниковых данных выполнен при поддержке Госзадания FNNN-2021-0006

ПОВЕРХНОСТНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС МИРОВОГО ОКЕАНА ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ И МОДЕЛЕЙ

Кукушкин В.М., Маркина М.Ю., Гулев С.К.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН

Ключевые слова: трансформация водных масс, климат, взаимодействие океана и атмосферы.

Образование поверхностных вод в океане происходит под воздействием процессов тепло- и влагообмена с атмосферой. Важно отметить, что интенсивность этих процессов имеет значение для определения глубины перемешанного слоя [1], который, в свою очередь, оказывает влияние на обмен массой, импульсом, энергией и теплом между атмосферой и океаном, играя важную роль в погоде и климате.

Одним из основных факторов, определяющих глубину перемешанного слоя, является поток плотности [2] на поверхности океана, который является обратной величиной потока плавучести. Величина этого потока определяется интенсивностью потоков тепла между океаном и атмосферой, разницей между осадками и испарением, соленостью и температурой воды, а также ручным стоком. Основная цель данной работы заключается в определении долговременной изменчивости характеристик взаимодействия океана и атмосферы в Мировом океане.

Поток плотности в данной работе рассчитывается для периода 1979–2018 год на основе данных реанализа NCEP CFSR\CFSv2, моделей MPI, INM и MIROC из проекта CMIP6. На основе данных расчетов выявлены характерные особенности сезонного хода и межгодовой изменчивости потоков плотности. Для анализа интенсивности тепло- и влагообмена у отдельных водных масс была рассчитана величина трансформации. Величина трансформации является интегралом по изопикне величины потока плотности и характеризует изменения плотности вод определенной плотности.

На основе данных CFSR выявлено, что пространственное распределение потока плотности определяется главным образом результирующим потоком тепла и имеет сезонную изменчивость. В основном в зимний период поток плотности имеет положительные значения, в летний - отрицательные, за исключением внутритропической зоны конвергенции и муссонных областей Индийского океана. Для каждого региона выражены периоды с преобладанием положительных и отрицательных значений трансформации. Так, например, в северной Атлантике и северной части Тихого океана период нагрева длится с апреля по сентябрь, а с октября по ноябрь поверхностные воды охлаждаются вследствие преобладания отрицательных потоков тепла. Для акваторий южной части Тихого и Атлантического океана и Индийского океана наблюдаются противоположные по знаку величины потоков тепла и, как следствие, потоков плотности. Сезонный ход выделяется даже для небольших акваторий Южного океана, причем отрицательные потоки плотности в данном регионе больше положительных вследствие влияния ледового покрова в холодное время года. В акватории Индийского и северной части Тихого океана наибольших величин достигает соленостная составляющая потока плотности, вследствие преобладания осадков. На основе данных моделей CMIP6 построены прогнозные ряды величины трансформации для характерных водных масс каждой акватории по сценариям ssp126, ssp370, ssp585. По этим данным выявлен тренд на снижение величин трансформации для промежуточных и модалльных вод высоких широт.

Работа выполнена при финансовой поддержке госзадания FMWE-2022-0002.

Список литературы

- 1) Walin G.S. On the relation between sea-surface heat flow and thermal circulation in the ocean // Tellus, 1982. – Т. 34. – №. 2. – С. 187–195.

- 2) Speer K., Tziperman E. Rates of water mass formation in the North Atlantic Ocean // Journal of Physical Oceanography, 1992. – T. 22. – №. 1. – C. 93-104.

СТРУКТУРА ВОД В РАЗЛОМЕ ПУЩАРОВСКОГО ПО ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ 2023 ГОДА

Куликова Ж.М., Демидов А.Н., Добролюбов С.А.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: Северо-атлантическая глубинная водная масса, Антарктическая донная водная масса, разлом Пушаровского, циркуляция вод

Трансформные разломы Срединно-Атлантического хребта играют важную роль в циркуляции вод. На пути распространения из западной Атлантики в восточную Антарктические донные (ААДВ) и Северо-атлантические глубинные воды (САГВ) на глубинах их распространения (глубже 2-3 км) сталкиваются с препятствием в виде Срединно-Атлантического хребта, соответственно, поступление данных вод в восточную часть Атлантического океана возможно исключительно через трансформные разломы [1]. Эти воды являются важными составляющими глобальной термохалинной циркуляции. САГВ формируется в результате интенсивной глубинной конвекции в Гренландском море и море Лабрадор, отличительными особенностями данной водной массы в тропической части Атлантики являются повышенная соленость и содержание растворенного кислорода. В слое САГВ можно выделить нижний компонент (НСАГВ), отличающейся повышенным содержанием растворенного кислорода и залегающую непосредственно над ААДВ. Антарктическая донная водная масса формируется главным образом в море Уэдделла, в результате смешения более плотной и холодной антарктической шельфовой водной массы с более теплой и соленой Циркумполярной глубинной водной массой [3]. ААДВ характеризуется пониженными значениями температуры, солености, растворенного кислорода и повышенными значениями биогенных элементов, что сильнее выражается в концентрациях растворенного кремния [3, 4].

В ходе 65-го рейса ПС «Академик Иоффе» в период с 22 - 27.11.2023 был выполнен разрез из 8 станций в трансформном разломе Пушаровского (7° 40' с.ш.). Исследование структуры вод было выполнено на основании натуральных данных температуры и солености, полученных STD-зондом Sea-Bird 19 plus, и гидрохимических параметров: растворенного кислорода, фосфатов и силикатов, определенных в соответствии со стандартными методиками [2] в судовой лаборатории.

В структуре вод в разломе Пушаровского на каждой станции выделяется Северо-Атлантическая глубинная водная масса по повышенным значениям растворенного кислорода от 5,90 до 6,01 мл/л. Антарктическую донную водную массу можно проследить в западной части разлома по характерным значениям потенциальной температуры от 1,27 до 1,8°С, пониженным относительно вышележащего слоя САГВ содержанием растворенного кислорода (от 5,64 до 5,86 мл/л), а также повышенными значениями содержания растворенного кремния (от 48 до 72 $\mu\text{M}/\text{л}$). В слое САГВ значения растворенного кремния в разломе Пушаровского изменяются в диапазоне от 33,63 до 40 $\mu\text{M}/\text{л}$. По соотношению силикатов и фосфатов и положению максимальных вертикальных градиентов гидрофизических характеристик установлено, что изотерма $\theta=1,8^\circ\text{C}$ лучше соответствует верхней границе ААДВ.

Перенос ААДВ через разлом Пушаровского оценивается в 0,34 Св [1], правда, в этом расчете ААДВ ограничивались изотермой $\theta=2^\circ\text{C}$. Через рифтовую долину в районе 36° 40 з.д. часть ААДВ попадает из разлома Пушаровского в разлом Вернадского. Это отмечается в сокращении Антарктической водной массы при дальнейшем продвижении в восточную часть разлома. На границе НСАГВ и ААДВ (на глубине около 4100 м) происходит смешение данных водных масс, что выражается в наличии большого вертикального градиента растворенных силикатов (6 $\mu\text{M}/\text{л}$ на 100 м).

В результате на разрезе прослеживается процесс поступления ААДВ в восточную Атлантику через трансформный разлом Пушаровского из западной Атлантики, а также поступление ААДВ

в трансформный разломы Вернадского и Долдрамс через систему рифтовых долин. Повышенные содержания биогенных элементов отмечаются на придонном горизонте западной части разлома в сочетании с относительно пониженными значениями кислорода. По мере продвижения вдоль разлома на восток абсолютные значения содержания биогенных элементов снижаются, а значения растворенного кислорода и потенциальной температуры возрастают, что обусловлено как трансформацией в ходе водообмена с НАГВ, отличающейся повышенными значениями температуры и кислорода, так и с перетоком ААДВ в разлом Вернадского через рифтовую долину.

Авторы выражают благодарность Машуре В.В., Торгуновой Н.И. и экипажу 65-го рейса ПС "Академик Иоффе".

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-17-00032 «Взаимодействие Северо-атлантических глубинных и Антарктических водных масс в тропической части Атлантического океана».

Список литературы

- 1) Демидов А. Н. и др. СТРУКТУРА И ПЕРЕНОС ГЛУБИННЫХ И ДОННЫХ ВОД В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИКИ // Сборник трудов X Международной научно-практической конференции. Том I (III). -Тверь, 2021- с. 54-58.
- 2) Сапожников В. В. и др. Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана. – 2003.
- 3) Morozov E., Demidov A., Tarakanov R., Zenk W. Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows. Springer, 2010. 266 p. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9358-5>.
- 4) Ferreira M. L., Kerr R. Source water distribution and quantification of North Atlantic deep water and Antarctic bottom water in the Atlantic Ocean //Progress in Oceanography. – 2017. – Т. 153. – С. 66-83.

ХАОТИЗАЦИЯ ПОЛЯ ПЛОТНОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Куприянова А.Е.^{1,2}, Гриценко В.А.²

¹Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия, 236016, Калининград, ул. А. Невского, д. 14

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36

Ключевые слова: отрицательная плавучесть, конвективные элементы, сезонная конвекция, случайный ансамбль, выхолаживание с поверхности, лабораторный эксперимент, численная модель

Плотностная структура приповерхностного слоя воды формируется, как известно [1, 2], под воздействием теплообмена на границе раздела воздух-вода, испарения и осадков, льдообразования и т.д. В осенне-зимний период под поверхностью воды возникает тонкий пограничный слой воды с гидростатически неустойчивым распределением плотности. По мере роста толщины слоя формируются условия для возникновения плотностной неустойчивости типа Релея-Тэйлора, которые приводят к появлению на нижней границе слоя множества конвективных элементов в виде малых объемов воды с отрицательной плавучестью (или термиком). Пространственно-временной масштаб потока отрицательной плавучести, возникающего в результате погружения термиком в подстилающие воды, носит случайный характер [3]. Ранее выполненные исследования [4] показали присутствие квазипериодической составляющей в процессе зарождения термиком. Таким образом, в общем виде процесс выхолаживания воды с поверхности реализуется, как генерация и последующая эволюция ансамбля конвективных элементов (или «дождика»), погружающихся в нижележащие воды.

Целью данной работы является демонстрация хаотизации поля плотности в приповерхностном слое воды, возникающая вследствие генерации ансамбля конвективных элементов и их взаимодействия между собой в процессе их погружения в подстилающие воды.

Исследование процесса погружения ансамбля конвективных элементов, возникающих в результате плотностной неустойчивости в приповерхностном слое воды, проводилось в гидрлотке лаборатории физики моря (АО ИО РАН, г. Калининград). Перед экспериментами гидрлоток медленно наполнялся пресной водой (~ 14 °С) через отверстие в нижней его части. На поверхность воды в лотке помещались специальные входные устройства типа «окно» (плита из пенополистирола с отверстием 2×9 см). Плотностная неустойчивость в приповерхностном слое воды достигалась путем введения в него подготовленного теплого (~ 16 °С) солевого раствора (NaCl, х.ч.). Более детальное изучение распределения плотности в приповерхностном слое воды проводилось при помощи нелинейной двумерной модели динамики стратифицированной по плотности жидкости [5].

Лабораторные эксперименты позволили получить обычно наблюдаемую картину погружения ансамбля конвективных элементов в нижележащие воды. На начальном этапе под поверхностью входного устройства «окно» формировалось пятно с отрицательной плавучестью (10^{-4} — $2 \cdot 10^{-4}$ г/см³, $\Delta\rho$), на нижней границе которого через короткий промежуток времени (от 5 до 10 секунд) возникали малые объемы воды, погружающиеся в глубину. В ходе экспериментов в лотке отмечался случайный характер в зарождении малых объемов и их перемежаемость, а интенсификация конвективных движений происходила с изменением величины объема солевого раствора в приповерхностном слое воды. Обработка полученных снимков процесса погружения ансамбля позволила выявить частоту зарождения конвективных элементов в слое воды с неустойчивым распределением плотности: на начальном этапе формирования (примерно 8-10 секунд от начала эксперимента) множества элементов — 4,66 шт/см, на этапе развития вертикального конвективного перемешивания (около 23-25 секунд от начала) — 5,63 шт/см. В среднем скорость продвижения

фронта малых объемов воды с отрицательной плавучестью составляла 0.3 см/с (при $\Delta\rho = 10^{-4}$ г/см³, объеме $V = 5$ мл). При увеличении перепада плотности между пресной водой и солевым раствором в лотке наблюдалось увеличение размеров конвективных элементов.

Численные эксперименты показали значительную перемежаемость поля плотности в окрестности погружающегося ансамбля конвективных элементов. Рассчитанные градиенты поля плотности (для случая $\Delta\rho = 10^{-4}$ г/см³ и 5 верхних слоев расчетной сетки с линейным профилем плотности) показали также значительную изменчивость этого поля. При увеличении градиента плотности в приповерхностном слое воды происходит рост частоты зарождения конвективных элементов.

Наблюдаемую картину значительной перемежаемости поля плотности (температуры) как в лотке, так и в расчетах можно интерпретировать как температурную турбулентность [6].

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00150, <https://rscf.ru/project/23-27-00150/>.

Список литературы

- 1) Хунджуа Г. Г., Гусев А. М., Андреев Е. Г., Скорохватов Н. А., Гуров В. В. О структуре поверхностной холодной пленки океана и о теплообмене океана с атмосферой // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1977. Т. 13, № 7. С. 753–758.
- 2) Федоров К. Н., Гинзбург А. И. Приповерхностный слой океана. Л: Гидрометеиздат, 1988. 303 с.
- 3) Гладышев С. В., Гладышев В. С., Фалина А. С., Сарафанов А. А. Зимняя конвекция в море Ирмингера в 2004–2014 гг. // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 353–363.
- 4) Дикарев С. Н., Поярков С. Г., Чувильчиков С. И. Лабораторное моделирование мелкомасштабной конвекции под нарастающим ледяным покровом в зимнем Арктическом разводе // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 70–79.
- 5) Kupriyanova A. E., Gritsenko V. A. Sinking patches of salt water on a slope of bottom surrounded by fresh water: dynamics and structural features of density front propagation up the slope. Journal of oceanological research. 2022, 50 (2), 106–124, doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2022.50(2).5
- 6) Бубнов Б. М., Голицын Г. С. Термическая турбулентность и вращение // Этюды о турбулентности. М.: Наука, 1994. С. 18-31.

ВЛИЯНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ РЕЧНОГО СТОКА И ТАЯНИЯ МОРСКОГО ЛЬДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ОПРЕСНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МОРЕЙ СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА

Кускова Е.Г., Осадчиев А.А., Иванов В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: опресненный слой, талая вода морского льда, речной сток, Обь-Енисейский плюм, Ленский плюм

Ежегодно в теплый сезон в морях Сибирского шельфа (Карское море, море Лаптевых и Восточно-Сибирское море) формируется значительная по площади область поверхностного опреснения. Основным источником пресной воды является речной сток: Обь-Енисейский плюм в Карском море, достигающий площадь 200 000 – 250 000 км² [1] и Ленский плюм в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском, распространяющийся на площади 250 000 – 500 000 км² в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском море [2]. Считается, что вклад талой воды морского льда в Обь-Енисейский и Ленский плюмы невелик, хотя его фактический объем остается неизвестным.

Данная работа направлена на исследование взаимодействия двух важных источников пресной воды на Сибирском шельфе - речного стока и талой воды. В работе используется новый набор данных о толщине морского льда в Северном Ледовитом океане, полученных со спутника Cryosat-2 в период таяния с 2012 по 2020 гг. [3]. Для исследования талой воды в морях сибирского шельфа были использованы спутниковые данные о концентрации морского льда AMSR2 с пространственным разрешением 6.25 км и временным разрешением 1 сутки [4].

Для вычисления объема пресной воды (QSIM), образованной в результате таяния морского льда, использовалась формула $QSIM = \Delta V \cdot AS \cdot AV / S$, где $V = C_{ice} \cdot T_{ice}$ - объем морского льда в точке сетки, равный произведению концентрации морского льда C_{ice} (перепроецируется на сетку 80 км) и толщины морского льда, $AS = 0.8$ - коэффициент нормализации солёности талой воды до нулевой солёности пресной воды, $AV = 0.9$ - коэффициент нормализации объема льда до объема талой воды, $S = 6400$ км² - площадь ячейки сетки. На основе данных о толщине и о сплочённости морского льда AMSR2 с пространственным разрешением 80 км и временным разрешением 2 недели была дана количественная оценка фактического годового объема талой воды, которая была получена Обь-Енисейским и Ленским плюмами в течение 2012-2020 годов.

Таким образом, в работе было выявлено, что пресная вода, образованная талыми водами, является важным источником для Ленского плюма, обеспечивающего в среднем 20% общего годового содержания пресной воды. Более того, эта доля пресных вод в Ленском плюме демонстрирует большую межгодовую изменчивость (14-29%), т.е. в определенные годы пресные воды, образованные таянием морского льда, обеспечивает почти треть объема пресной воды Ленского плюма. Эта изменчивость определяется межгодовой изменчивостью толщины льда, а также сезонной изменчивостью условий таяния морского льда. Что касается вклада пресных вод в Обь-Енисейский плюм, то он относительно невелик (в среднем 8%), а его общая годовая доля колеблется от 6 до 11% в течение исследуемого периода. Такое различие в основном обусловлено значительно меньшей площадью Обь-Енисейского плюма по сравнению с Ленским. Прогнозируемое более раннее начало таяния льдов в Северном Ледовитом океане в последующие десятилетия из-за изменения климата может уменьшить вклад талых вод в Обь-Енисейский плюм, в то время как его влияние на Ленский плюм остается неясным.

Данное исследование финансировалось Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, тема FMWE-2021-0001 (обработка спутниковых данных), программа развития Московского физико-технического института (приоритет-2030) (обработка данных о морском

льду), Российский научный фонд, исследовательские проекты 23-17-00087 (изучение речных шлейфов в Северном Ледовитом океане) и 23-17-00001 (изучение талой воды морского льда в Северном Ледовитом океане).

Список литературы

- 1) Osadchiev, A. A., Frey, D. I., Shchuka, S. A., Tilinina, N. D., Morozov, E. G., and Zavialov, P. O. (2021a). Structure of freshened surface layer in the Kara Sea during ice-free periods. *J. Geophys. Res. Oceans* 126, e2020JC016486. doi: 10.1029/2020JC016486
- 2) Osadchiev, A.A., Frey, D.I., Spivak, E.A., Shchuka, S.A., Tilinina, N.D., and Semiletov, I.P. (2021b). Structure and inter-annual variability of the freshened surface layer in the Laptev and East-Siberian seas during ice-free periods. *Front. Mar. Sci.* 8, 735011. doi: 10.3389/fmars.2021.735011
- 3) Landy, J. C., Dawson, G., Tsamados, M., Bushuk, M., Stroeve, J. C., Howell, S. E. L., et al. (2022). A year-round satellite sea-ice thickness record from CryoSat-2. *Nature* 609, 517–522. doi: 10.1038/s41586-022-05058-5
- 4) Spreen, G., Kaleschke, L., and Heygster, G. (2008). Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *J. Geophys. Res.* 113, C02S03. doi: 10.1029/2005JC003384

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЗАИМОСВЯЗИ НИСХОДЯЩЕЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ

Латонин М.М.^{1,2}, Демченко А.Ю.^{1,2}

¹Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Арктика, климатические изменения, Арктическое усиление, температура поверхности Земли, нисходящая длинноволновая радиация, сезонность, модель ступенчатых изменений, реанализ ERA5.

Современное потепление климата проявляется наиболее ярко в Арктическом регионе, что характеризуется явлением Арктического усиления глобального потепления [1]. При этом в некоторых районах Арктики температура поверхности Земли и приповерхностная температура воздуха растут быстрее, чем в других. Цель данного исследования – выявить на основе данных климатического реанализа ERA5 пространственно-временную структуру климатических изменений в Арктике за период 1959–2022 гг. по трём параметрам: нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе, приповерхностной температуре воздуха и температуре поверхности Земли. Выбор именно этих параметров связан с тем, что формирование Арктического усиления может определяться влиянием нисходящей длинноволновой радиации при ясном небе [2, 3]. При этом численные оценки Арктического усиления как правило получают по данным приповерхностной температуры воздуха и/или температуры поверхности Земли.

К временным рядам исследуемых характеристик в каждой точке сетки всей Арктики (67°с.ш.–90°с.ш.) была применена статистическая модель ступенчатых изменений, описанная в [4]. Полученные результаты указывают на тесную связь между всеми параметрами в зимний сезон (среднее за декабрь–март). Доминирующий в Арктике год ступенчатых изменений – 2005 г.; при этом именно этот переход из одного состояния климатической системы в другое является статистически значимым на значительной территории, которая находится преимущественно в Восточном полушарии. Осреднённые по этим районам временные ряды высоко коррелированы между собой, а 2005 г. характеризует смену резкого роста величин на их изменчивость без выраженного тренда. Таким образом, нисходящая длинноволновая радиация при ясном небе – один из ведущих факторов формирования термического режима Арктики.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-77-01046 (<https://rscf.ru/project/23-77-01046/>).

Список литературы

- 1) Serreze, M.C., Barry, R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. V. 77 (1–2). 2011. P. 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- 2) Lu, J., Cai, M. Seasonality of polar surface warming amplification in climate simulations // Geophysical Research Letters. V. 36 (16). 2009. L16704. <https://doi.org/10.1029/2009GL040133>
- 3) Cai, Z., You, Q., Chen, H.W., Zhang, R., Chen, D., Chen, J., Kang, S., Cohen, J. Amplified wintertime Barents Sea warming linked to intensified Barents oscillation // Environmental Research Letters. V. 17 (4). 2022. 044068. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5bb3>

- 4) Latonin, M.M., Lobanov, V.A., Bashmachnikov, I.L. Discontinuities in Wintertime Warming in Northern Europe during 1951–2016 // *Climate*. V. 8 (6). 2020. 80. <https://doi.org/10.3390/cli8060080>

ГЕНЕРАЦИЯ ЦУНАМИ ПОДВОДНЫМИ ОПОЛЗНЯМИ И СИЛА ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Лебков М.В.

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

Ключевые слова: цунами, подводные оползни, линейная потенциальная теория, линейная теория длинных волн, сила волнового сопротивления

Несмотря на то, что большинство цунами вызывается землетрясениями, подводные оползни могут внести значительный, а иногда и определяющий вклад в формирование волн [1, 2]. По этой причине для прогнозирования цунами может быть полезным заранее учесть цунамиопасность интересующего региона, рассчитав долю потенциальной энергии оползневого тела, переходящую к волнам. Так как рельеф океанического дна известен достаточно точно, такие оценки можно провести заблаговременно, что позволит понять, насколько опасным может быть самостоятельный сход подводного оползня и последующая генерация цунами, или же насколько сопутствующий землетрясению подводный оползень изменит картину созданных основным источником волн.

Классическая теория длинных волн (мелкой воды) применяется при длинах волн, заметно превышающих глубину водоёма. В случае генерации волн подводным оползнем длина волны, имеющая тот же порядок, что и размер оползневого тела, не всегда описывается данным соотношением, что приводит к тому, что теория длинных волн даёт завышенную оценку для энергии, так как при движении тела на большой относительно его размеров глубине генерация волн происходит менее интенсивно, чем при описании процесса в рамках теории мелкой воды. Потенциальная теория, учитывающая влияние глубины водоёма, позволяет сделать более точную оценку значения энергии волн.

Цель данной работы – аналитический подход к решению задачи о генерации волн подводным оползневым телом и выявление закономерностей, позволяющих лучше понять данный процесс. Для этого в рамках линейной потенциальной теории решалась задача о генерации волн при движении недеформируемого оползневого тела единичного фронта, стартующего из положения покоя с постоянной скоростью, по горизонтальному дну канала постоянной глубины. В таком случае можно получить аналитические выражения для вычисления значений потенциала скорости в каждой точке интересующей нас области в любой момент времени от начала движения, и, соответственно, величин смещения свободной поверхности жидкости и компонент скорости по осям Ox и Oz . Тем не менее, получившиеся выражения содержат интегралы, не рассчитываемые аналитически, что приводит к необходимости численного интегрирования [3]. Впоследствии можно определить кинетическую, потенциальную и полную энергию волн и сравнить её с результатами аналитического решения аналогичной задачи в рамках линейной теории длинных волн [4].

Влияние генерации волн на движение тела, её вызывающего, проявляется посредством силы волнового сопротивления, работа которой и является полной энергией волн. Из значения изменения полной энергии волн за определённый промежуток времени можно получить оценку величины силы волнового сопротивления, которую необходимо сравнить с другими тормозящими силами – силой «сухого» трения под водой и силой турбулентного сопротивления. На основании данного сравнения можно сделать вывод о степени влияния силы волнового сопротивления на движение тела в различных случаях.

Задача о движении оползневого тела из состояния покоя под действием сил решалась численно для различных модельных склонов. Для каждого шага по времени рассчитывалась скорость движения тела, а затем решалась задача о генерации волн в рамках линейной потенциальной теории. Полученные результаты также сравнивались с результатами решения аналогичной задачи, поставленной в рамках линейной теории длинных волн.

В результате был подтверждён вывод о том, что линейная теория длинных волн, не учитывающая ослабление генерации волн оползневым телом при росте глубины, даёт завышенную оценку при движении оползневого тела на больших глубинах. При этом рассмотрение соскальзывания оползневого тела под действием сил по модельным склонам показало, что нередко оползневые тела в океане движутся на глубинах, сравнимых с их размерами, что приводит к необходимости рассмотрения задачи в рамках потенциальной теории, которая даёт возможность получить более реалистичные оценки итоговой энергии волн цунами.

Работа выполнена в рамках написания магистерской диссертации без дополнительного финансирования.

Список литературы

- 1) National Geophysical Data Center/World Data Service (NGDC/WDS). Global historical tsunami database. – 2024.
- 2) Tappin D. R. et al. Did a submarine landslide contribute to the 2011 Tohoku tsunami? //Marine Geology. – 2014. – Т. 357. – С. 344-361.
- 3) Носов М.А. «Введение в теорию волн цунами». Учебное пособие. – М.: Янус-К, 2019, 170 с.
- 4) Tinti S., Bortolucci E., Chiavettieri C. Tsunami excitation by submarine slides in shallow-water approximation //Pure and Applied Geophysics. – 2001. – Т. 158. – С. 759-797.

ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ВЕТРА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕРМОХАЛИННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Левонян К.А.¹, Багатинский В.А.^{1,2,3,4}, Дианский Н.А.^{1,3,4}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, г. Москва

⁴Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва

Ключевые слова: Северная Атлантика, АМОЦ, климат, моделирование, INMOM.

Взаимодействие океана и атмосферы является важнейшим фактором во многих аспектах, включающих в себя прогнозирование погоды, климата, процессов на границе среды вода-воздух, в структуре поверхностных течений. Масштабные движения водных масс внутри океанов, которые связаны между собой глобальным океанским конвейером, играют ключевую роль в формировании особенностей свойств климата, а их анализ позволяет выявить объяснения происходящих явлений. Особую роль в климатической системе Земли играет Атлантический океан. Являясь важной частью глобального океанского конвейера, он определяет множество ключевых процессов в атмосфере.

Для выяснения роли термохалинных факторов в формировании климатических трендов термохалинной циркуляции в Северной Атлантике (СА) были определены вклады изменений потенциальной температуры, солёности и приповерхностной скорости ветра в тренды функции тока Атлантической меридиональной опрокидывающейся циркуляции (АМОЦ). Для этого с помощью модели INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) и данных электронного атласа EN4 (MetOffice, Великобритания) методом «диагноз – адаптация» восстанавливалась циркуляция СА за характерные периоды 1951–2023, 1951–1990 и 1991–2023 гг.

Обнаружено, что общий тренд функции тока АМОЦ совпадает по знаку с трендом АМОЦ, вызванным изменениями зональной компоненты скорости приповерхностного ветра. При этом, в двух выбранных периодах 1951–2023 и 1951–1990 гг. все основные особенности изменений в АМОЦ объясняются главным образом температурными изменениями, которые превалируют над солёностными [Багатинский и Дианский, 2022]. Наблюдаемый тренд на ослабление основного ядра функции тока АМОЦ с 1991 по 2023 г. вызывается изменениями солёности, а на усиление основного ядра функции тока АМОЦ с 1951 по 1990 г. – изменениями потенциальной температуры. Вклад зональной компоненты приповерхностной скорости ветра в изменчивость АМОЦ достигает до 30% от общей изменчивости. Можно сделать вывод, что общий тренд АМОЦ формируется изменениями зональной компоненты скорости ветра, а термохалинная циркуляция подстраивается под эту изменчивость и поддерживает ее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 22-17-00267.

Список литературы

- 1) Багатинский В.А., Дианский Н.А. Вклады климатических изменений температуры и солёности в формирование трендов термохалинной циркуляции Северной Атлантики в 1951-2017 гг. // ВМУ. Серия 3. 2022. № 3. С. 73–88.
- 2) Gouretski V., Reseghetti F. // Deep-Sea Research I. 2010. V. 57. P. 812.
- 3) Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на коротко-периодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М., 2013.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТПО ОТДЕЛЬНЫХ РАЙОНОВ БАРЕНЦЕВА МОРЯ И ИХ ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ

Лис Н.А., Чернявская Е.А., Тимохов Л.А.

ГНЦ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Баренцево моря, температура воды, атмосферная циркуляция, арктический диполь, межгодовая изменчивость

В Северном Ледовитом океане наиболее ярко проявляются изменения климата, наблюдаемые несколько последних десятилетий [1]. Баренцево море является одним из связующих районов между Атлантическим океаном и Арктическим бассейном. А температура поверхности океана (ТПО) по праву считается одним из индикатором изменений климата. В данной работе была исследована межгодовая изменчивость температуры поверхности океана отдельных районов Баренцева моря. Данные по ТПО взяты из океанского реанализа ERA-5 за период 1949–2023 годы с дискретностью в месяц в узлах сетки $0,25 \times 0,25^\circ$. В качестве наиболее вероятных факторов, формирующих изменчивость ТПО рассмотрены глобальные климатические индексы, такие как Арктическая осцилляция АО (www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/ao/), Северо-Атлантическое колебание NAO (www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/nao/) и Арктический диполь AD. Арктический диполь был рассчитан как вторая мода разложения по естественным ортогональным функциям полей давления на высоте 500гПа (<https://cds.climate.copernicus.eu/>). Районы Баренцева моря для удобства соответствуют районам однородного ледового режима [2].

Выделено три основных периода в изменениях долгопериодных колебаний ТПО отдельных районов Баренцева моря: 1949-1969 гг., 1970-1990 гг., 1991-2023 гг. Первый период (1949-1969 гг.) характеризуется наличием отрицательного линейного тренда в наиболее холодные месяцы (март-апрель). Зона отрицательных трендов распространяется через Центральное плато, Южно-Баренцевоморскую впадину, вплоть до Центральной возвышенности и ограничивается на западе Адмиралтейской возвышенностью. В основном, данные области относятся к южной и центральной частям западного района, а также затрагивают небольшую часть южной части северо-восточного района. Максимальная величина тренда составляет более $-3,3^\circ\text{C}/21\text{год}$ в районе Центрального плато. В летние месяцы за первый период величина тренда отрицательная, но сам тренд статистически не значим во всех районах моря. Для второго периода (1970-1990 гг.) характерно отсутствие в зимний и летний сезоны линейного тренда на всей акватории моря. Третий период (1991-2023 гг.) принято называть «условно теплым», характеризуется статистически значимым линейным трендом практически на всей акватории, с максимальной величиной тренда более $4,5^\circ\text{C}/33\text{года}$, лишь севернее 77°с.ш. тренд не выделяется. Наибольшая изменчивость выделяется в летние месяцы во всех районах. Максимальные значения стандартного отклонения характерны для юго-восточного района, наименьшие - для северо-восточного. Стоит отметить, что в «условно теплый» период увеличивается не только ТПО, но и дисперсия. За первый (1949-1969 гг.) и второй (1970-1990 гг.) периоды в западном и северо-восточном районах стандартное отклонение значительно меньше, чем за третий (1991-2023 гг.) период.

Несомненно влияние атмосферной циркуляции на изменения ТПО [3]. Один из важнейших показателей для климата Арктического региона — это индекс Арктического колебания. Частной модой которого является индекс Северо-Атлантического колебания NAO. В первый период (1949-1969 гг.) в 73% случаев в зимние месяцы наблюдается отрицательная фаза, когда над Северным Ледовитым океаном усиливается антициклоническая деятельность, что приводит к ослаблению поступления теплых воздушных масс из Северной Атлантики и, как следствие, уменьшение ТПО. Во второй период соотношения случаев положительной и отрицательной фаз сравнивается. В

третий период преобладает положительная фаза (67%). Данной фазе соответствует высокое атмосферное давление над средними широтами, что вынуждает циклоны перемещаться по более высоким широтам, обуславливая тем самым поступление теплых вод Северной Атлантики в Баренцево море. Наибольший интерес индекс NAO представляет в зимние месяцы, когда происходит углубление Исландской депрессии и усиление Азорского ЦДА [4]. В летний сезон Исландская депрессия практически распадается и не оказывает столь значительного влияния на ТПО Баренцева моря. В первый период (1949-1969 гг.) более чем в 80% случаев в марте отмечается положительная фаза индекса, во время которой происходит усиление зонального переноса воздушных масс, что приводит к понижению температуры воздуха и, как следствие, уменьшению ТПО. Во второй период количество положительных и отрицательных фаз за зимний сезон практически сравнивается. В третий период "условного потепления" значительно возрастают случаи отрицательной фазы индекса NAO в зимние месяцы (до 76%). В отрицательную фазу усиливается меридиональный перенос, что способствует интенсификации Северо-Атлантического течения и, как следствие, увеличение ТПО в Баренцевом море. Начиная с 1990-х годов в арктической дипольной аномалии, которая характеризуется индексом AD, все чаще проявляется положительная фаза. А влияние AD проявляется как все более доминирующее [5]. С ноября по июнь положительная фаза преобладает в более чем 70% случаев. Когда давление над круговоротом Бофорта и Канадским архипелагом усиливается, а над Карским морем ослабевает, усиливается меридиональный перенос, из-за возникающей дипольной структуры, располагающейся поперек полюса. Что приводит к усилению антициклонического круговорота Бофорта и трансполярного дрейфа к усилению адвекции тепла в Арктику и способствует повышению приповерхностной температуры воздуха, соответственно, увеличению ТПО.

Таким образом, важнейшим фактором, формирующим межгодовые изменения ТПО Баренцева моря, является изменчивость атмосферной циркуляции. Причём, в связи с некоторым ослаблением влияния Арктической осцилляции, доминирующим становится дипольная структура атмосферной циркуляции.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00221

Список литературы

- 1) WMO Provisional State of the Global Climate 2022. – 2022. Geneva, Switzerland. - 2023. - 26 p.
- 2) Миронов Е.У. Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: АНИИ, 2004. 320 с.
- 3) Никифоров Е. Г., Шпайхер А. О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 269 с.
- 4) Нестеров Е.С. Североатлантическое колебание: атмосфера и океан. М.: Триада ЛТД, 2013. 144 с.
- 5) Polyakov I. V. et al. Fluctuating Atlantic inflows modulate Arctic atlantification //Science. – 2023. – Т. 381. – №. 6661. – С. 972-979.

МЕРИДИОНАЛЬНОЕ И ЗОНАЛЬНОЕ СМЕЩЕНИЕ ВИХРЕЙ ТЕЧЕНИЯ АГУЛЬЯС

Малышева А.А.¹, Гневых В.Г.², Белоненко Т.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: Агульяс, альтиметрия, мезомасштабные вихри, аномалии уровня моря, антициклоны, меридиональное смещение, волны Россби, метод автоматической идентификации.

Исследование посвящено анализу Агульясовых вихрей, пересекающих Южную Атлантику. Многие исследователи отмечают, что при перемещении вихрей происходит значительное меридиональное смещение к полюсу или экватору, в зависимости от полярности вихрей. Исходя из этого, основной целью данной работы является анализ треков долгоживущих антициклонов, пересекающих Южную Атлантику. Таким образом, меридиональное смещение Агульясовых вихрей является нашим главным интересом. Для исследования были использованы данные продукта автоматической идентификации и трекинга вихрей «Mesoscale Eddies in Altimeter Observations of SSH». За период наблюдений (1993–2017 гг.) при помощи метода было выделено 55596 вихрей течения Агульяс: 29019 циклонов и 26577 антициклонов. Показано, что долгоживущими вихрями Агульяса являются только антициклоны, так как большинство циклонов диссипируют вскоре после генерации. Для исследования мы проводим анализ 15 треков долгоживущих антициклонов (продолжительность жизни >2.5 лет).

Показано, что вихри Агульяса, пересекающие Южную Атлантику, распространяются почти прямолинейно на северо-запад. Параметры вихрей (радиус, амплитуда, скорость перемещения и орбитальная скорость) незначительно изменяются на протяжении жизни вихрей, также мы не обнаруживаем значительного ослабления вихрей при пересечении крупных форм рельефа. Мы оцениваем зональное и меридиональное смещение вихрей Агульяса отдельно на каждом участке трека. Установлено, что имеется прямая зависимость между скоростью вихря и его меридиональным смещением в единицу времени. Также были проанализированы теоретические обоснования явления смещения вихрей, однако мы отмечаем, что большинство теоретических подходов к меридиональному смещению являются сугубо математическими и не учитывают условия генерации вихрей.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-27-00004.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННИХ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ТУРБУЛЕНТНЫЕ ПОТОКИ ТЕПЛА И ИМПУЛЬСА НАД МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Марчук Е.А.¹, Чунчuzов И.П.¹, Попов О.Е.¹, Репина И.А.^{1,2}, Козлов И.Е.³, Сильвестрова К.П.⁴, Осадчиев А.А.⁴, Степанова Н.Б.^{4,5}, Йоханнессен У.М.⁵

¹ *Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г.Москва*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г.Москва*

³ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г.Москва*

⁴ *Московский Физико-Технический институт, г.Долгопрудный*

⁵ *Научное общество Нансена, г.Берген, Норвегия*

Ключевые слова: внутренние волны, турбулентные потоки, спектральный анализ, механизмы генерации, Карское море.

Работа посвящена исследованию характеристик внутренних волн в Карском море и их взаимодействию с атмосферой, в частности их влиянию на турбулентные потоки импульса и тепла в приводном слое атмосферы. Предложен возможный механизм влияния наблюдаемых гравитационных мод в слое термоклина на мезомасштабные флуктуации метеопараметров (с периодами от 10 мин до нескольких часов) и турбулентные потоки импульса, явного и скрытого тепла в приводном слое атмосферы.

Основные исследования внутренних волн в арктическом регионе проводятся на основе натуральных наблюдений с судов и буйковых станций [1]. Спутниковые данные, полученных с помощью радаров с синтезированной апертурой, позволяют более детально изучить характеристики внутренних волн и собрать более полную годовую и межгодовую картину изменчивости их характеристик [2,4].

В августе 2021 года проводилась экспедиция «Плавучий университет ИО РАН — МФТИ» в Карское море на научно-исследовательском судне «Академик Иоффе». На борту судна был установлен инфракрасный (ИК) радиометр HEITRONICS KT19 II, точность измерений которого составляла 0.1°C, а частота измерений 1 Гц. Одновременно с этим на океанологических станциях проводилось измерение температуры моря с помощью двух кос с дискретными термодатчиками и одного профилемера, измеряющего температуру воды по всей своей длине. Расстояние по глубине между датчиками составляло 1,5-2 м, измерения проводились до глубины около 70 м. Особенности работы с данными термокос описаны в работе [5].

С помощью метода когерентного анализа временных флуктуаций температуры морской воды на глубине 18 м, измеренных одновременно 12 августа тремя разнесенными горизонтально термодатчиками в течение короткого промежутка времени в 22 мин, определены направление и горизонтальная фазовая скорость распространения КВВ относительно дрейфующего судна в диапазоне периодов 40-160 с. Скорости распространения этих волн относительно судна составляли 0.14-0.16 м/с. Это направление КВВ близко к направлению распространения (на С-В) уединенных нелинейных внутренних волн (солитонов), наблюдавшихся 12 августа в проливе Карские Ворота и описанных в работе [3] и распространявшихся со скоростью 0.8-0.9 м/с, что говорит о том, что высокочастотные внутренние волны и солитон являлись разными составляющими единого волнового пакета. Основным источником генерации этого волнового пакета были приливные устойчиво-стратифицированные течения, обтекающие рельеф дна в проливе Карские Ворота [3].

Анализ кросс-спектров мезомасштабных флуктуаций инфракрасной температуры поверхности моря, температуры моря на глубинах 10 и 20 м с помощью термокос и метеопараметров на высоте 22 м показал влияние наблюдаемых внутренних волн в Карском море на мезомасштабные

флуктуации метеорологических полей вблизи поверхности моря (периоды от нескольких мин до нескольких часов) и вертикальные турбулентные потоки тепла и импульса через поверхность моря в приводный слой атмосферы. В кросс-спектрах флуктуаций обнаружены общие спектральные максимумы на периодах, лежащих между минимальным периодом БВ (~ 3.3 мин) и максимальным периодом БВ (20 мин -1 ч) в морском слое до глубины 30 м. Эти периоды типичны для захваченных внутренних гравитационных мод, распространяющихся как в слое океанического пикноклина, так и для атмосферных гравитационных мод в устойчиво-стратифицированном слое нижней тропосферы.

Было также исследовано влияние мезомасштабных вариаций скорости ветра на высоте 22 м над уровнем моря и разности температур поверхности воды и воздуха (δ) (с периодами от 10 мин до нескольких часов) на вариации турбулентных потоков импульса, явного (Q_H) и скрытого тепла (Q_L) вблизи поверхности моря. На основе полученных временных спектров вариаций турбулентных потоков показано, что основное влияние на эти вариации оказывает дискретный набор колебаний разности температур (δ) и скорости ветра с определенным дискретным набором периодов (20 мин, 25 мин, 35 мин, 1ч, 3 ч и 4.7 ч) относительно судна. Эти периоды типичны для атмосферных гравитационных волн разных масштабов, распространяющихся в устойчиво-стратифицированном нижнем слое тропосферы и модулирующих на указанных периодах вертикальные градиенты температуры и скорости ветра, а также турбулентные потоки тепла и импульса.

Данная работа была частично поддержана грантом Российского научного фонда (РНФ) №21-17-00021 и частично Научным Обществом Нансена, а также выполнена в рамках темы гос. задания №FNNN-2024-0017. Экспедиционные исследования проведены при поддержке научно-образовательной программы «Плавучий университет ИО РАН - МФТИ».

Список литературы

- 1) Зимин А.В. Внутренние волны на шельфе Белого моря по данным натурных наблюдений // Океанология, 2012. – Т. 52, № 1. – С. 16–25.
- 2) Свергун Е.И., Зимин А.В., Атаджанова О.А., Коник А.А., Зубкова Е.В., И.Е. Козлов Изменчивость фронтальных разделов и короткопериодные внутренние волны в Баренцевом и Карском морях по данным спутниковых наблюдений за тёплый период 2007 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018. – Т. 15, №4. – С. 181–188.
- 3) Kozlov I.E., Kopyshov I.O., Frey D.I., Morozov E.G., Medvedev I.P., Shiryborova A.I., Silvestrova K.P., Gavrikov A.V., Ezhova E., Soloviev D.M., Plotnikov E.V., Zhuk V.R., Gaisky P.V., Osadchiev A.A., Stepanova N.B. Multi-Sensor Observations Reveal Large-Amplitude Nonlinear Internal Waves in the Kara Gates, Arctic Ocean // Preprints, 2023. – 2023101853.
- 4) Kopyshov I.O., Kozlov I.E., Shiryborova A.I., Myslenkov S.A. Properties of Short-Period Internal Waves in the Kara Gates Strait Revealed from Spaceborne SAR Data // Russian Journal of Earth Sciences, 2023. – V. 23. – ES0210.
- 5) Silvestrova K., Myslenkov, S.A., Puzina O., Mizyuk A., Bykhalova O. Water Structure in the Utrish Nature Reserve (Black Sea) during 2020–2021 According to Thermistor Chain Data // Journal of Marine Science and Engineering, 2023. – 11. – 887.

ЦУНАМИ В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ: ПОИСК НАИХУДШИХ СЦЕНАРИЕВ НА ОСНОВЕ ДЕТЕРМИНИСТСКОГО ПОДХОДА

Медведев И.П., Цуканова Е.С., Крылов А.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: цунами, море Лаптевых, численное моделирование, детерминистский подход, землетрясение

Традиционно цунамиопасность в Арктике, в том числе в море Лаптевых, считается незначительной [1,2]. Это объясняется, прежде всего, относительно низкой сейсмической активностью региона. Однако отсутствие прямых свидетельств о проявлениях цунами может объясняться малонаселенностью Арктического побережья и весьма редкой сетью уровенных постов. Большинство землетрясений в Арктике связано с сейсмоактивной зоной, протягивающейся от Исландии через глубоководную часть Арктики до шельфа моря Лаптевых [1,3].

В представленном исследовании были получены оценки высот волн цунами в море Лаптевых на основе детерминистского подхода (поисков наилучших сценариев). На основе [3,4] были оценены максимальные предельные магнитуды региональных землетрясений. С помощью формул из работы [5] для каждого сценария были рассчитаны вертикальные смещения морского дна, сформированные подводными землетрясениями и выполнено численное моделирование распространения волн цунами. Для численного моделирования была использована модель И.В. Файна (IOS, Canada), которая является разновидностью модели TUNAMI. В этой модели реализована конечно-разностная аппроксимация уравнений мелкой воды в сферической системе координат. Решается задача Коши, т.е. предполагается, что в начальный момент $t = 0$ жидкость находится в состоянии покоя, и задано начальное отклонение свободной поверхности океана. На свободной границе задается условие излучения, а на береговой границе – условие непротекания. Модель была адаптирована для вычислительных сеток с постоянным шагом в полярной стереографической проекции. Область расчета для численного моделирования распространения цунами в Арктическом регионе была выбрана в виде прямоугольника с максимальным разрешением 6951×11369 узлов с пространственным шагом 200 м. Шаг по времени при численном моделировании выбирался равным $1/4$ величины, задаваемой условием устойчивости Куранта численной схемы. В качестве батиметрии использовался массив глубин ИВСаО (версия 4.2).

В рамках детерминистского подхода к оценке цунамиопасности акватории моря Лаптевых было рассмотрено более 100 региональных сценариев, когда очаги землетрясений располагались в районе подводного хребта Гаккеля и непосредственно в акватории моря Лаптевых.

Показано, что направление распространения основной энергии волн цунами существенно зависит от особенностей топографии дна. Так, резкое увеличение высот волн цунами будет наблюдаться после выхода на шельф моря Лаптевых. Далее, вероятно, энергия волн будет существенно диссипировать из-за донного трения. Таким образом, из-за широкого мелководного шельфа, волны цунами, сформированные вблизи материкового склона, почти не проявятся в юго-восточной части моря Лаптевых (губа Буор-Хая и Янский залив).

При сценариях, когда очаг землетрясения расположен в районе хребта Гаккеля (как в случае землетрясения 1964 г. [1]), а $M_w = 7.8$ – наблюдаются наиболее высокие волны на побережьях островов моря Лаптевых. Основная энергия волн цунами, сгенерированная этим источником, направлена в сторону п-ва Таймыр и в сторону о-ва Котельный. На побережье п-ва Таймыр высота волн цунами составила до 5 м, на о. Большой Бегичев – до 1.2 м, о. Песчаный – до 2.9 м. На побережье Анабарского залива высота волн достигла 1 м. На побережье о. Котельный высота волн цунами составила 3–4 м, а на отдельных участках побережья – до 6 м.

В сценариях, когда очаг землетрясения располагался на шельфе море Лаптевых, из-за мелководности акватории (глубина от 15 м до 80 м), вытесняется относительно небольшой объем воды, что приводит к формированию достаточно малых (для $M_w = 7.8$) высот волн цунами. Для сценария, когда очаг располагался в центральной части моря Лаптевых с глубинами около 40-50 м, высота волн цунами достигла 0.3 м в районе дельты р. Лены и на побережье о. Котельный, и до 0.6 м на побережье о. Лейкина, который расположен к северо-западу от дельты Лены. Основной поток энергии этой виртуальной волны цунами направлен в сторону Оленекского залива, как раз через о. Лейкина. При очагах, расположенных, к востоку от дельты р. Лены, максимальные высоты волн цунами наблюдаются на восточном побережье полуострова, на котором расположена дельта р. Лены – до 0.7 м. В других частях акватории моря Лаптевых высота волн цунами не превысила 0.1 м. При сценариях, когда очаг землетрясения расположен к северу от дельты р. Лены, высота волн цунами на северном побережье дельты достигла 1 м, тогда как на других участках побережья моря Лаптевых не превысила 0.15 м.

В результате детерминистского подхода была получена карта максимальных высот цунами вдоль побережья моря Лаптевых, построенная на результатах численного моделирования большого количества наихудших сценариев землетрясений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-17-00125.

Список литературы

- 1) Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Яковенко О.И., Ковачев С.А. К вопросу о цунамиопасности арктического региона // Арктика: экология и экономика, 2016. – № 3 (23). – С. 38–49.
- 2) Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Файн И.В., Яковенко О.И. Цунамиопасность арктического побережья России. Часть 2. Численное моделирование цунами // Геориск, 2019. – Т. 13. – № 3. – С. 6–17. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-6-17>.
- 3) Куликов Е.А., Иващенко А.И., Медведев И.П., Файн И.В., Яковенко О.И. Цунамиопасность арктического побережья России. Часть 1. Каталог вероятных цунамигенных землетрясений // Геориск, 2019. – Т. 13. № 2. – С. 18–32, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-2-18-32>.
- 4) Ковачев С.А., Ананьев Р.А., Крылов А.А., Либина Н.В. Оценка сейсмического потенциала разломной зоны на шельфе моря Лаптевых палеосейсмологическим методом // Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)». 2023.
- 5) Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the Seismological Society of America, 1985. – V. 75. – No. 4. – P. 1135–1154.

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ ДЛЯ БЕРИНГОВА И ЧУКОТСКОГО МОРЕЙ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСОКЕАНСКИХ И ЛОКАЛЬНЫХ ЦУНАМИ

Медведева А.Ю.¹, Файн И.В.², Медведев И.П.¹, Куликов Е.А.¹, Яковенко О.И.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова, РАН

²Institute of Ocean Sciences, Sidney, BC, Canada

Ключевые слова: Берингово море, Чукотское море, цунами, Тихий океан, землетрясение, трансокеанское цунами, Чилийское землетрясение, Алеутские острова, сейсмический источник, моделирование цунами.

Опасность цунами для Берингова и Чукотского морей была оценена на основе численного моделирования восьми крупных землетрясений дальнего действия в Тихом океане (1946 г. на Алеутах, 1952 г. на Камчатке, 1960 г. в Чили, 1964 г. на Аляске, 1965 г. на Крысиных островах, 1957 г. на островах Андреанова, 2011 г. на Тохоку и 2012 г. на Хайда Гвай) и одного внутреннего землетрясения в Беринговом море (Командорские острова, 2017 год). Для проверки модели были использованы данные о записях цунами Тохоку 2011 года на острове Сент-Пол, в Порт-Меллере и Номе в Беринговом море. Согласно нашим численным расчетам, цунами, вызванное чилийским землетрясением 1960 года магнитудой 9,5, вызвало самый сильный отклик в Беринговом море с амплитудой волн до 2,7 м, в то время как для Камчатского цунами 1952 года (второго по силе отклика) максимальные амплитуды волн составили до 1,5 м. Великое землетрясение на Аляске 1964 года (магнитуда 9,2) не вызвало существенного цунами в Беринговом море, поскольку полуостров Аляска защищал регион от набегающих волн цунами. Мы также оценили эффективность проникновения отдаленных цунами в Берингово море, а затем в Чукотское море/Северный Ледовитый океан. Согласно нашим расчетам, типичный коэффициент ослабления для проливов, проходящих через Алеутские острова, составляет в среднем 0,75, в то время как соответствующий коэффициент для Берингова пролива равен 0,29. Основываясь на этих оценках, мы приходим к выводу, что вероятность проникновения цунами в Северный Ледовитый океан из удаленных тихоокеанских источников мала. Даже при таком мощном событии, как цунами в Чили в 1960 году, амплитуда волн цунами в Чукотском море, относящаяся к Северному Ледовитому океану, не превышала нескольких сантиметров. Однако для Берингова моря волны цунами от крупных отдаленных землетрясений могут быть значительными [1].

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 24-17-00313.

Список литературы

- 1) Medvedeva A. et al. Local and trans-oceanic tsunamis in the Bering and Chukchi Seas based on numerical modeling // Pure and Applied Geophysics. 2023. V. 180, № 5. P. 1639–1659.

МНОГОЛЕТНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПРОЛИВА ШОКАЛЬСКОГО

Меркулов В.А., Махотин М.С., Кузьмин С.Б., Карпов М.В., Богородский П.В., Тимохов Л.А.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, Карское море, море Лаптевых, Арктика, Северная Земля, пролив Шокальского, водная масса, термохалинная структура.

С 2014 года на архипелаге Северная Земля проводится комплексное изучение природной среды, которое включает в себя целый ряд различных исследований: метеорологические, океанологические, гидрологические, гляциологические и ряд других. Проведение данных исследований стало возможно благодаря открытию в 2013 году на севере острова Большевик (арх. Северная Земля) научно-исследовательского стационара «Ледовая база Мыс Баранова». Океанологические исследования здесь производятся в непосредственной близости от стационара в акватории пролива Шокальского. Этот пролив расположен между островами Большевик и Октябрьской Революции и соединяет между собой Карское море и море Лаптевых.

Имеющиеся до 2014 года исторические океанографические данные о распределении термохалинных характеристик в проливе Шокальского и западной части моря Лаптевых у побережья Северной Земли обладают большой временной неоднородностью (1932, 1948, 1985, 1992-1993, 2007) [1]. Ежегодные океанологические исследования, начавшиеся с 2014 г. в проливе Шокальского, продемонстрировали значительную пространственную и временную изменчивость термохалинных характеристик, а также выявили некоторые особенности перемещения водных масс в проливе [2].

Наибольший интерес вызывает исследование процесса проникновения теплых атлантических вод на шельф моря Лаптевых и в пролив Шокальского. На протяжении всего периода исследований в желобах пролива Шокальского наблюдается наличие трансформированной атлантической водной массы (АВМ), проникающей сюда с шельфового склона, расположенного севернее пролива. Причём по полученным данным замечено, что проникновение происходит с периодом в 4 года. Так в 2016 и 2020 гг температура АВМ в проливе Шокальского достигала значений 0.2 °С и выше, тогда как в 2014 и 2018 гг АВМ в проливе не наблюдалось, и температура придонных вод была ниже -1 °С. Приход этой водной массы оказывает заметное влияние на термохалинную структуру акватории пролива.

Кроме того, на процессы, происходящие в исследуемой акватории заметное влияние могут оказывать внешние факторы. В первую очередь это динамика и изменение ледяного покрова. Припай в проливе Шокальского образуется в ноябре-декабре каждого года и может покрывать его вплоть до августа. При этом ежегодно в течение зимнего периода к северу от пролива наблюдается образование стационарной полыньи. Все эти ледовые процессы, происходящие в акватории пролива Шокальского, а также в соседних морях, оказывают очень большое влияние на термохалинную структуру и теплообмен, происходящий на границе океан-лёд-атмосфера.

Крупнейшие реки России, Лена, Енисей, Обь и Амур формируют опреснённые линзы размером в сотни километров [3]. Кроме того, а островах архипелага Северная Земля присутствуют десятки рек, которые ежегодно питают акваторию пролива Шокальского пресными водами. Эти факторы могут приводить к образованию здесь поверхностных речных плюмов, способных так же оказывать своё непосредственное влияние на гидрологию пролива. Ежегодно в июне и июле фиксируется резкое падение солёности воды в поверхностном слое пролива, связанное как с таянием припая, так и с реками, образующимися на островах архипелага и впадающими в пролив. Солёность воды в этот период падает до значений 12-15 ‰.

Проведение постоянного океанологического мониторинга пролива Шокальского в комплексе с другими исследованиями, выполняемыми на НИС «Ледовая база Мыс Баранова», позволяют глубоко проанализировать и изучить многие гидрологические процессы, происходящие в данной акватории. В докладе будут представлены первые результаты такого анализа.

Финансирование: ФГБУ ААНИИ.

Список литературы

- 1) Махотин М.С., Блошкина Е.В., Тимохов Л.А., Ипатов А.Ю., Кузьмин С.Б., Ашик И.М., Меркулов В.А., Фильчук К.В. Результаты океанографических исследований в проливе Шокальского в 2014-2016 гг. // Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база мыс Баранова» / Под общей редакцией д-ра физ.-мат наук А.П. Макштаса и В.Т. Соколова. - СПб.: ААНИИ, 2021. С. 148–169.
- 2) Савельева Н.И., Добротина Е.Д., Кузьмин С.Б. и др. Изменчивость гидрохимических характеристик поверхностных вод пролива Шокальского по результатам наблюдений на научно-исследовательском стационаре «Ледовая база Мыс Баранова» в 2018–2019 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2021. Т. 676 № 1. С. 10–27. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-1-10-27>.
- 3) Осадчиев А.А. Речные плюмы. – М.: Научный мир, 2021. 288 с.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ГЛУБОКОВОДНОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В 2022 – 2023 ГГ.

Куссе-Тюз Н.А., Тарасенко А.Д., Меркулов В.А., Карпов М.В., Игнатов Д.А., Павский С.В., Фильчук К.В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт", Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Арктический бассейн, водные массы, "Северный полюс - 41", in situ данные

Летом 2022 года было сдано в эксплуатацию новое российское научно-экспедиционное судно (НЭС) - ледостойкая платформа (ЛСП) "Северный Полюс". Данное судно было построено специально для проведения научно-исследовательских работ в высокоширотной Арктике. Оно позволяет наблюдать за состоянием Северного Ледовитого океана (СЛО) в круглогодичном режиме. Второго октября 2022 года "Северный Полюс" ошвартовался у однолетней льдины с целью вмёрзнуть в лёд для годичного дрейфа. На этой льдине была открыта дрейфующая научно-исследовательская станция "Северный полюс – 41" (СП-41), ставшая продолжением серии дрейфующих станций "Северный полюс", начавшихся в 1937 году.

Основной целью исследований в области физической океанографии являлось получение новых натуральных данных об океанографическом режиме, а также мониторинг термохалинного состояния вод в приполюсном районе Арктического бассейна.

Океанографические исследования были ориентированы на решение, в том числе, следующих задач:

- определение структуры водных масс в районе дрейфа с оценкой их термохалинных характеристик;
- исследование термохалинных неоднородностей в приповерхностных и атлантических слоях вод, а также в слое главного пикноклина;
- и других

В работе показаны особенности организации океанографических измерений на дрейфующей станции СП-41 и результаты термохалинного зондирования водной толщи СЛО, полученные за отрезок дрейфа с 16 октября 2022 года по 10 июля 2023 года, когда станция находилась за пределами исключительной экономической зоны Российской Федерации. Этот отрезок дрейфа СП-41 проходил в центральном Арктическом бассейне. Дрейф станции начался в котловине Подводников, затем станция пересекла хребет Ломоносова; далее дрейф продолжался в котловине Амундсена и над хребтом Ломоносова в направлении на север, затем станция вновь пересекла котловину Амундсена в юго-западном направлении, прошла над хребтом Гаккеля в западном направлении. Наконец станция продвинулась на юг в котловину Амундсена, где, в центральной части абиссальной равнины Баренца, и завершился рассматриваемый участок дрейфа. Общая продолжительность данного отрезка дрейфа составила 281 сутки. За это время общая протяженность маршрута дрейфа составила 1381 морскую милю (2558 км), при этом генеральный дрейф в направлении 332 градуса составил 653 морские мили (1209 км). Средняя скорость дрейфа составляла около 5 морских миль в сутки. На протяжении дрейфа из океанографического терминала со льда было выполнено 250 океанографических станций (из них 185 станций, преимущественно до глубин около 1500 м) и с борта судна (65 станций, преимущественно до дна).

Вдоль всей траектории дрейфа наблюдались воды атлантического происхождения (АВ). Их верхняя граница менялась от 100 до 170 метров, нижняя от 650 метров над хребтом Ломоносова

до 1150 метров в котловине Подводников. Максимальная температура ядра АВ изменялась от 1 до 2.4 градусов Цельсия, с солёностью 34.8-34.9 промилле. Особенно значительные отличия характеристик АВ отмечались по разные стороны хребта Ломоносова.

С начала дрейфа мощность верхнего квазиоднородного слоя постепенно росла с 25 метров в октябре до 100 метров в июне. Это объясняется тем, что начало дрейфа практически совпало с началом сезона ледообразования во время которого наблюдается активное вертикальное конвективное перемешивание. Солёность росла с 32.1 до 34.3 промилле соответственно. Температура в этот период соответствовала температуре замерзания воды. Далее, в начале июля началось образование летней арктической водной массы с повышением температуры до -1.6 градусов Цельсия и падением солёности до 33.9 промилле.

Донные водные массы по обе стороны хребта Ломоносова в начале дрейфа значительно отличались по температуре, составляя около -0.4 градуса Цельсия в котловине подводников и около -0.7 градусов Цельсия в котловине Амундсена.

Финансирование осуществлялось в рамках федерального бюджета.

ВОДООБМЕН МЕЖДУ КОТЛОВИНАМИ КАБО-ВЕРДЕ И СЬЕРРА-ЛЕОНЕ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

Мехова О.С.^{1,2}, Смирнова Д.А.¹, Фрей Д.И.^{1,3}, Кречик В.А.^{1,4}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

³ Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

⁴ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

Ключевые слова: проход Кейн, Антарктическая донная вода, объемный перенос вод, потенциальная температура, котловина Кабо-Верде, котловина Сьерра-Леоне, абиссальные течения.

Антарктическая донная вода (ААДВ), образуясь в море Уэдделла, распространяется в северную и восточную часть Атлантического океана. Продвигаясь по абиссальным каналам и котловинам, эта водная масса является важной частью термохалиной циркуляции. Проход Кейн (9° с.ш.) находится в восточной части Атлантики, соединяя котловину Кабо-Верде, в которую ААДВ попадает из разлома Вима (11° с.ш.), и котловину Сьерра-Леоне, в которую приходит поток ААДВ из разлома Романш (1° ю.ш.) [1, 2]. Проход Кейн является одним из ключевых мест на пути распространения ААДВ и самым глубоководным проходом между котловинами Сьерра-Леоне и Кабо-Верде в восточной части тропической Атлантики [3]. В нем происходит постоянная смена структуры и направления течений в зависимости от объемов переноса через названные разломы [1]. Его седловина имеет более пологий юго-восточный склон и более крутой северо-западный. Настоящая работа посвящена исследованию объемного переноса антарктических вод в проходе Кейн, и является продолжением исследования изменчивости потока ААДВ в этом проходе.

В работе были использованы результаты CTD и LADCP измерений, полученные в экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2009, 2010, 2011, 2012, 2022 гг. По данным CTD измерений, придонная потенциальная температура на седловине в эти годы не опускалась ниже 1.83°C, при этом в котловинах ее значения достигали 1.78°C. Высота слоя ААДВ на седловине не превышает 500 м, внутри канала потенциальная температура не поднимается выше 1.95°C.

Данные, полученные в процессе зондирований, позволили проанализировать изменение пространственной структуры течений в проходе Кейн. Были зафиксированы разнонаправленные потоки в разных частях прохода. Для определения объемного переноса были определены жидкие границы для всех поперечных разрезов, выполненных на седловине: 19.81° в.д., 19.89° в.д. Верхняя граница определялась по значениям потенциальной температуры $\theta = 2^\circ\text{C}$ и $\theta = 1.9^\circ\text{C}$. Изотерма потенциальной температуры 2°C во все года располагается на глубине близкой к 4000 метров, тогда как $\theta = 1.9^\circ\text{C}$ располагалась на глубинах от 4200 до 4500 м. Следовательно, величина переноса в слое ограниченном $\theta = 2^\circ\text{C}$ будет зависеть, в основном, от скорости и направления течения, в то время как объемный перенос в слое с верхней границей $\theta = 1.9^\circ\text{C}$ зависит и от высоты слоя, и от скорости течения. Перенос с верхней границей $\theta = 2^\circ\text{C}$ всегда направлен на северо-запад, т.е. из котловины Сьерра-Леоне в котловину Кабо-Верде, и варьируется от 0.28 Св (2009 г.) до 0.11 Св (2010 г.). При этом объемный перенос, ограниченный изотермой $\theta = 1.9^\circ\text{C}$ изменяется в диапазоне от 0.13 Св (2012 г.) до -0.04 Св (2011 г.).

На основании полученных данных можно говорить о том, что в проходе Кейн поток ААДВ имеет неоднородную пространственную структуру и периодически меняет направление. Величина объемного переноса в канале зависит от направления и скорости течения, а также от выбора критерия верхней границы ААДВ для расчетов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-77-20004.

Список литературы

- 1) Morozov E.G., Tarakanov R.Y., Frey D.I. Bottom Gravity Currents and Overflows in Deep Channels of the Atlantic Ocean Observations, Analysis, and Modeling // Springer Nature. 2021.
- 2) Frey D.I., Morozov E.G., Fomin V.V., Diansky N.A., Tarakanov R.Y. Regional modeling of Antarctic Bottom Water flows in the key passages of the Atlantic // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. <https://doi.org/10.1029/2019JC015315>
- 3) van Haren H., Morozov E., Gostiaux L., Tarakanov R. Convective and shear-induced turbulence in the deep Kane Gap // J. Geophys. Res. Oceans. 2013. V. 118. P. 5924–5930. Doi:10.1002/2013JC009282.

О ВЛИЯНИИ ГЛОБАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ВОДЫ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ААНИИ В ЗАЛИВЕ ПРЮДС)

Молчанов М.С., Антипов Н.Н, Кашин С.В., Кузнецова М.Р.

ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Антарктика, Южный океан, залив Прюдс, Антарктическая донная вода, Антарктическая шельфовая вода, Циркумполярная глубинная вода, каскадинг, антарктический склоновый фронт, материковый склон

В докладе обсуждаются результаты экспедиционных исследований процессов формирования Антарктической донной воды (АДВ) в заливе Прюдс (море Содружества), проведенных в период с 2004 по 2023 гг. Анализируются данные океанологических наблюдений на разрезе по 70° в.д., выполненном за указанный период 10 раз, и пересекающем шельф и материковый склон в районе, где в летний период 2004 года экспедиция ААНИИ на НЭС «Академик Федоров» впервые зафиксировала факт формирования АДВ. Дальнейшие наблюдения подтвердили регулярность этих процессов в летний период. Обнаружена существенная межгодовая изменчивость структуры, характеристик, механизмов распространения основных водных масс на разрезе – Антарктической шельфовой (АШВ) и циркумполярной глубинной (ЦГВ) водных масс, а так же АДВ . [1]

В 2016 г в долготном диапазоне от 70° в.д. до 71° в.д. была выполнена площадная съемка, состоящая из 9 меридионально ориентированных разрезов. Высокое пространственное разрешение (1,5 – 2 км между станциями) на полигоне позволило получить подробную картину мезомасштабной структуры вод над материковым склоном и прилегающей шельфовой областью [2]. Исследованы особенности структуры антарктического склонового фронта (АСФ), формирующегося в результате склонового каскадинга холодных АШВ при их взаимодействии с теплыми ЦГВ.

В 68 сезонную РАЭ (2023 г.), при повторном (после 6-летнего перерыва) выполнении полигона были выявлены важные изменения в структуре и характеристиках вод данной области Южного океана, имеющие существенные последствия для процессов климатического масштаба. Обнаружена значительная интенсификация (в сравнении с предыдущими наблюдениями с 2004 по 2016 г) поступления в район материкового склона теплой глубинной воды из Антарктического циркумполярного течения (АЦТ). Это проявилось в заметном увеличении мощности слоя ЦГВ, в первую очередь за счет подъема более чем на 200 м их верхней границы. При этом теплое ядро ЦГВ поднялось в среднем на 300 м, следствием чего стало увеличение потока тепла в поверхностные слои, приведшее к уменьшению глубины зимней конвекции (до 60 м в среднем относительно 100 м в предыдущие годы) и рост температуры (до -1.6 °С при обычном ниже -1.8 °С) в ядре Антарктической зимней воды (АЗВ). [3]

Увеличение интенсивности поступления ЦГВ является следствием изменчивости климатического масштаба в режиме АЦТ, и в 2023 г проявилось в аномально низкой ледовитости не только района моря Содружества, но и Южного океана в целом. В свою очередь, климатическим следствием роста поступления ЦГВ на шельф является наблюдаемая (в основном для Западной Антарктиды) интенсификация таяния шельфовых ледников, ведущая к дестабилизации ледового щита Антарктиды.

Наблюденные изменения в глубине залегания и характеристиках поверхностных и глубинных вод связаны со смещением в сторону полюса южной границы АЦТ [4]. Подобная топография ядер (глубины залегания) характерна для области Южного океана, расположенной севернее (как показал разрез по 70° в.д., выполненный в 2007 г, северная станция которого находилась на 65 ю.ш.).

Наблюдения 2023 года подтвердили важный факт смещения к югу южной границы АЦТ (определенный ранее по данным спутниковых наблюдений [4]). Увеличение интенсивности поступления ЦГВ в 2023 г проявилось в аномально низкой ледовитости не только района моря Содружества, но и Южного океана в целом. В свою очередь, климатическим следствием роста поступления ЦГВ на шельф является наблюдаемая (в основном для Западной Антарктиды) интенсификация таяния шельфовых ледников, ведущая к дестабилизации ледового щита Антарктиды.

Работа выполнялась в рамках проекта 5.2 НИТР Росгидромета «Комплексные океанологические, климатические, гляциологические и геофизические исследования Антарктики и Южного океана».

Список литературы

- 1) Антипов Н.Н., Кашин С.В., Молчанов М.С. Глубоководные океанографические исследования залива Прюдс в сезонный период 68-й РАЭ // Российские полярные исследования. 2023. № 3 (53). С. 31-35.
- 2) Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В., Молчанов М.С., Кашин С.В., Чистяков И.А. Пространственные закономерности стока плотных вод на антарктическом шельфе и материковом склоне // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 91-110.
- 3) Антипов Н.Н., Кашин С.В., Молчанов М.С. Влияние глобальных климатических изменений на процессы, формирующие структуру вод на шельфе и материковом склоне в заливе Прюдс (восточная Антарктида) // В книге: Моря России: от теории к практике океанологических исследований. тезисы докладов Всероссийской научной конференции. Севастополь, 2023. С. 118-120.
- 4) Herraiz-Borreguero, L., Naveira Garabato, A.C. Poleward shift of Circumpolar Deep Water threatens the East Antarctic Ice Sheet. Nat. Clim. Chang. 12, 728–734 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01424-3>

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ВДОЛЬ ТРАССЫ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

Мысленков С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: Северный морской путь, ветровое волнение, безледный период, Арктика, WAVEWATCH III

Климатические и геополитические изменения приводят к интенсификации освоения альтернативных торговых маршрутов в Арктике. Акватория Северного морского пути (СМП) представляет собой водное пространство, прилегающее к северному побережью России, охватывающее внутренние морские воды, территориальное море, прилежащую зону и исключительную экономическую зону России [1]. Уменьшение сплоченности льда на трассе СМП в летние месяцы показано в работе [2]. Увеличение продолжительности безледного периода (ПБП) в прибрежной зоне Карского моря за период 1979–2019 гг. отмечено в работе [3]. В работе [4] на основе модели WAVEWATCH III получены прогнозы режима ветрового волнения в Арктике на основе свходных данных ансамбля СМП5.

В данной работе по данным моделирования ветрового волнения за период с 1979 по 2021 год представлен анализ высоты волн и продолжительности безледного периода, с оценками трендов вдоль СМП.

Использовалась база данных ветрового волнения для морей российской Арктики, полученная ранее на основе данных моделирования [5, 6]. Моделирование выполнено при помощи волновой модели WAVEWATCHIII, схемы генерации волн ST6, а для учета влияния льда схемы IC0. Расчеты проводились с использованием неструктурных сеток с высоким разрешением в прибрежной зоне. При моделировании волнения использовались данные о ветре и концентрации льда с шагом по времени 1 час из реанализа NCEP/CFSR (1979–2010) с пространственным разрешением $\sim 0,3^\circ$ и реанализа NCEP/CFsv2 (2011–2021) с разрешением $\sim 0,2^\circ$.

Анализ параметров ветрового волнения осуществлялся для двух «условных» маршрутов (северный и южный) через акваторию СМП, согласно схеме из [1]. Методика обработки и анализа была следующая: из базы данных ветрового волнения для каждой точки вдоль обоих маршрутов по СМП выбирались данные о высоте значительных волн с шагом 3 часа за период с 1979 по 2021 год (43 года). Далее анализ данных был проведен в каждой точке отдельно для среднесезонных значений и для трендов среднегодовых значений за период 43 года. Анализ трендов выполнен для каждого узла вдоль маршрутов на основе массивов статистических характеристик волнения для каждого года. Визуализация результатов выполнена в виде столбчатых диаграмм отдельно для северного и южного маршрутов с запада на восток с шагом ~ 20 км.

Среднее значение ПБП в Карском море составляет от 150 суток на границе с Баренцевым морем и до 50 суток в районе пролива Вилькицкого. Минимальные значения ПБП около 30 суток наблюдаются на северном маршруте СМП в Восточно-Сибирском море. На южном маршруте в Восточно-Сибирском море ПБП приблизительно в 2 раза больше, чем на северном маршруте.

Среднесезонная высота волн в безледный период превышает 2 м в Баренцевом море, 1,6 м в Чукотском и не превышает 1,2 м на остальном протяжении маршрута. Максимальная высота волн и 95-й перцентиль высоты волн на северном маршруте существенно больше чем на южном.

Практически все тренды для параметров волн и ПБП положительны на акватории СМП, кроме 95-го перцентиля и максимальной высоты волн на западе Баренцева моря. На всем протяжении СМП тренды ПБП составляют 15–20 суток за 10 лет, а максимальные значения тренда - 52 суток за 10 лет наблюдаются к северу от Новой Земли. Минимальные значения трендов ПБП наблюдаются в районе пролива Вилькицкого и в северо-восточной части Карского моря. Максимальный тренд

для высоты волн в безледный период наблюдается в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигает 0,33 м за 10 лет.

Максимальные значения тренда на северном маршруте наблюдаются в восточной части Восточно-Сибирского моря и достигают 0,48 м за 10 лет для 95-го перцентиля и 1,1 м за 10 лет для максимальной высоты волн. Тренд для высоты волн в безледный период на южном маршруте в Восточно-Сибирском море приблизительно в 3 раза меньше, чем для северного маршрута и составляет 0,12 м за 10 лет.

Полученные результаты могут быть использованы как режимные и экстремальные значения высоты волн при планировании грузоперевозок по СМП. В основном находящиеся на СМП суда предназначены для эксплуатации в открытом океане и выдерживают высоту волн более 8 м. Однако, высота волн более 2–4 м может оказаться критической при таких сложных операциях как буксировка буровых платформ или перевозка опасных грузов. Критические значения по высоте волн указаны в правилах разработки и проведения морских операций Российского морского регистра судоходства.

Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 23-27-00239)

Список литературы

- 1) Осипова Е.Э., Смирнов С.В., Хаирова Т.А. Предпосылки развития экспорта российской Арктики, каботажных перевозок и проектных грузов для арктических проектов // Арктика и Север. 2019. № 37. С. 5–21
- 2) Шалина Е.В. Изменение ледовитости Северных морей России и оценка доступности Северного морского пути по данным спутникового мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2015. № 4. С. 67-78
- 3) Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 518–531
- 4) Мохов И.И., Погарский Ф.А. Изменения режимов морского волнения в Арктическом бассейне при изменениях климата в XXI веке по модельным расчетам // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 496. № 2. С. 189–193
- 5) Мысленков С.А. Моделирование ветрового волнения в море Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском морях // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2023. № 1(387). С. 87–101
- 6) Myslenkov S., Samsonov T., Shurygina A., Kiseleva S., Arkhipkin V. Wind waves web atlas of the Russian seas // Water. 2023. 15 (11). 2036

ИЗУЧЕНИЕ РАДИАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ CERES И ЭКСПЕРИМЕНТОВ МОДЕЛЕЙ CMIP6

Нарижная А.И.¹, Чернокульский А.В.^{1,2}

¹Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, г. Москва

²Институт географии РАН, г. Москва

Ключевые слова: радиационный эффект облачности, климат Арктики, данные моделирования, спутниковые данные, облачные характеристики, концентрация морского льда.

Арктика испытывает наиболее быстрые изменения климата на Земле в последние десятилетия [1]. Облака и свойства поверхности играют решающую роль в формировании теплового баланса поверхности этого региона, поскольку они определяют интенсивность коротковолнового (КВ) и длинноволнового (ДВ) излучения в нижних слоях атмосферы. Для изучения теплового баланса Арктики часто используются продукты как спутникового зондирования, так и данные моделирования. Однако было показано, что как спутниковые данные, так и данные модельных экспериментов в арктических широтах сильно разнятся между собой [2, 3, 4] и необходима верификация модельных данных относительно данных спутникового зондирования и наземных наблюдений.

В данной работе проведен сравнительный анализ облачно-радиационных характеристик по модельным данным (CMIP6) и спутниковым наблюдениям. Оценивался облачно-радиационный эффект, Вт/м², который характеризует воздействие облаков на радиационные потоки в атмосфере и определяется как разница между радиационными потоками при условии наличия облаков и в безоблачной атмосфере. Суммарный облачно-радиационный эффект на поверхности рассчитывается как сумма коротковолнового и длинноволнового облачно-радиационного эффектов, которые в свою очередь описываются как разница между радиационным балансом (коротковолновым или длинноволновым, соответственно) в реальной атмосфере (AS – all sky) и при чистом небе (CS – clear sky). Используются данные о коротковолновом и длинноволновом радиационном потоках на поверхности при полном и ясном небе по данным моделей CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) над акваториями высокоширотной Арктики (эксперимент historical). В качестве источника спутниковой информации, с которыми сравниваются модельные данные, используется синоптический спутниковый продукт (SYN) проекта NASA "Облака и Земная Система лучистой энергии" – Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES). Используются данные с месячным разрешением для всего арктического региона (севернее 65°с.ш.).

Сравнительный анализ проводился для двух сезонов: холодного (месяцы с января по март) и теплого (месяцы с июля по сентябрь). Для каждого месяца из выбранных сезонов радиационные параметры рассчитывались для атмосферы над морскими акваториями отдельно для регионов с разной сплоченностью морского льда (СМЛ): СМЛ <5% (открытая вода); СМЛ от 5% до 95% (переходная сплоченность льда); СМЛ >95% (сплошной лед). Анализ проведен за период с января 2001 г. по январь 2014 г. (совместный период для спутниковых данных CERES и для эксперимента historical для моделей CMIP6).

Показано, что наилучшее согласие между спутниковыми данными и данными модельных экспериментов получено при низкой сплоченности морского льда в летний период (разброс между данными составил 16 Вт/м² при среднем значении длинноволнового облачно-радиационного эффекта ~ 52 Вт/м²). Для зимнего периода различие между данными почти в два раза больше (медианные значения различаются на 30 Вт/м²): максимальные значения по данным модели IPSL-CM6A-LR составили 67,2 Вт/м², а по данным INM-CM5-0 38,8 Вт/м². Для обоих периодов резуль-

таты, полученные по спутниковым данным CERES, отражают среднее значение относительно ансамбля моделей: $52,8 \text{ Вт/м}^2$ для летнего периода и 55 Вт/м^2 для зимнего. Максимальное различие отмечено для полностью покрытой льдом поверхностью (сплоченность льда $>95\%$) для зимнего периода: данные моделирования показывают несколько заниженные значения длинноволнового облачно-радиационного эффекта относительно данных спутникового зондирования CERES. Для обоих периодов суммарный облачно-радиационный эффект был положителен: медианные значения по спутниковым данным составили $40,5 \text{ Вт/м}^2$ и $41,5 \text{ Вт/м}^2$ для сплошного льда, $41,5 \text{ Вт/м}^2$ и $41,8 \text{ Вт/м}^2$ для переходной СМЛ и $12,8 \text{ Вт/м}^2$ и $29,2 \text{ Вт/м}^2$ для открытой воды для летнего периода и зимнего периода, соответственно.

Работа выполнена при поддержке РНФ № 23-47-00104.

Список литературы

- 1) Esau I. et al. The Arctic Amplification and Its Impact: A Synthesis through Satellite Observations // Remote Sensing. 2023. V. 15, №. 5. P. 1354.
- 2) Zygmontowska M. et al. Arctic Clouds and Surface Radiation—a critical comparison of satellite retrievals and the ERA-Interim reanalysis // Atmospheric Chemistry and Physics. 2012. V. 12, № 14. P. 6667–6677.
- 3) Kay J.E., L’Ecuyer T. Observational constraints on Arctic Ocean clouds and radiative fluxes during the early 21st century // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118, № 13. P. 7219–7236.
- 4) Chernokulsky A. et al. Climatology of total cloudiness in the Arctic: An intercomparison of observations and reanalyses // Advances in Meteorology. 2012. V. 2012.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО И ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Новоселова Е.В.¹, Файман П.А.², Дидов А.А.², Будянский М.В.², Солонец И.С.³,
Белоненко Т.В.⁴

¹Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичёва ДВО РАН, г. Владивосток

³Институт Мирового океана ДВФУ, г. Владивосток

⁴Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Циркуляция вод, гидродинамическое моделирование, лагранжево моделирование, ROMS, ROMSPath, Лофотенская котловина, Северная Атлантика

Лофотенская котловина представляет собой понижение в рельефе дна Норвежского моря. Основными элементами циркуляции вод Лофотенской котловины являются ветви Норвежского течения: Норвежское фронтальное, Норвежское склоновое и Норвежское прибрежное течения. Лофотенская котловина является одним из самых динамически активных регионов Мирового океана и характеризуется локальными максимумами дисперсии уровня океана и кинетической энергии вихрей с различной формой вихревых ядер – от практически круглых в горизонтальном плане до сильно вытянутых филаментов [1]. Важной особенностью котловины является Лофотенский вихрь – квазипостоянный антициклонический вихрь, расположенный в центре котловины.

Моделирование циркуляции в Лофотенской котловине выполнялось в два этапа. На первом этапе использовалась региональная гидродинамическая модель ROMS (Regional Ocean Modeling System) [2]. На втором этапе использовалась лагранжева офлайн модель ROMSPath [3].

В смоделированное за первую неделю сентября 2008 г. гидродинамическое поле было запущено 6 пятен маркеров в районе расположения антициклонического Лофотенского вихря – по одному пятну на горизонт (от поверхности до 500 м через каждые 100 м), каждое пятно содержит около 1000 трассеров. Было выявлено, что на всех исследуемых глубинах происходит отрыв порций воды в западном и восточном направлениях. При этом данные порции воды перемещаются по преимущественно восходящим траекториям.

Целью настоящей работы является изучение вихрегенеза и трёхмерной динамики вод в Лофотенской котловине. В дальнейшем планируется выделить наиболее примечательные вихревые события (формирование вихрей, их слияние друг с другом, вытягивание в вихревую нить и др.) и провести детальный лагранжев анализ этих событий.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №23-17-00068.

Список литературы

- 1) Жмур В.В., Белоненко Т.В., Новоселова Е.В., Суетин Б.П. Приложение к реальному океану теории трансформации мезомасштабного вихря в субмезомасштабную вихревую нить при вытягивании его неоднородным баротропным течением // *Океанология*, 2023. – Т. 63. – № 2. – С. 211–223. DOI: 10.31857/S0030157423020156
- 2) Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. The Regional Oceanic Modeling System (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model // *Ocean Modelling*, 2005. Vol. 9. P. 347–404. DOI: 10.1016/j.ocemod.2004.08.002.
- 3) North E., Schlag Z., Hood R., Li M., Zhong L., Gross T., Kennedy V. Vertical swimming behavior influences the dispersal of simulated oyster larvae in a coupled particle-tracking and hydrodynamic

model of Chesapeake Bay // Marine Ecology Progress Series, 2008. – V. 359. – P. 99–115. DOI: 10.3354/meps07317.

ЧИЛИЙСКИЕ ЦУНАМИ 1960 И 2010 ГГ. НА ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И НАБЛЮДЕНИЯ

Онищенко Н.А.¹, Лоскутов А.В.², Медведева А.Ю.^{1,3}, Медведев И.П.³, Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск

³Институт океанологии имени П. П. Ширинова РАН, Москва

Ключевые слова: физика океана, цунами, моделирование, Тихий океан

На территории нашей страны наибольшее число опасных цунами наблюдается на Дальнем Востоке РФ, что делает актуальным изучение проблемы воздействия цунами на его побережье, вдоль которого значительно проявляются как близкие, так и трансокеанские катастрофические события. Так, например, цунами 22 мая 1960 г., вызванное мощнейшим за всю историю инструментальных наблюдений землетрясением с магнитудой $M_w = 9.5$, часто называемым Великим чилийским землетрясением, спустя более чем 20 часов распространения по Тихому океану вызвало волны до 7 м на восточном побережье Камчатки [1]. Цунами 27 февраля 2010 г. было вызвано землетрясением магнитудой $M_w = 8.8$, эпицентр которого находился неподалеку от источника Чилийского цунами. Высоты волн от этого цунами достигали существенно меньших значений на российском побережье, на побережье Парамушира - 1 м [2] при высоте волн на побережье Чили до 29 м [3]. Эти два примера подчеркивают сложный характер проявлений удаленных цунами и необходимость детального изучения подобных событий.

В основе большинства исследований, посвященных анализу цунами, проявляющихся на Дальнем Востоке РФ лежит сравнительный анализ результатов прямого численного моделирования с натурными данными, которых, в силу исторических причин для упомянутых событий было получено сравнительно мало. Данная работа нацелена на восполнение информации о проявлении Чилийских цунами и определить участки побережья, наиболее уязвимые для подобных трансокеанских катастроф.

Смысл работы сводится к детальному изучению особенностей проявления чилийских цунами 1960 и 2010 гг. на российском побережье по данным численного моделирования и натурных наблюдений. Для математического моделирования распространения цунами использовались современные модели очага цунами, построенные с помощью детальной информации о сейсмической подвижке в очаговой зоне и формул Окады. Расчет распространения волн осуществлялся с помощью известного кода TUNAMI-N2 на батиметрии GEBCO. Для верификации расчетов использовались мареограммы из литературных источников. Было оцифровано 5 мареограмм для события 1960 года, а 9 цифровых записей для цунами 2010 года было предоставлено сотрудниками Института морской геологии и геофизики ДВО РАН. По мареограммам оценивался период волн, времена добегаания и характер колебаний. Данные об абсолютных высотах волн при цунами могли быть искажены, так как мареографы того времени (1960 г.) имели очень узкую и длинную подводную трубу, что с высокой вероятностью могло отфильтровывать при заливании или засорении высокочастотную компоненту колебаний уровня, и соответственно, занижать реальные амплитуды. Кроме того, встречались случаи, когда зашкаливал самописец мареографа, и данные о реальной высоте просто невозможно было оценить. Также наблюдались некоторые расхождения между результатом моделирования и записями мареографов, так как точное местоположение мареографов в указанный период неизвестно, и модельные точки выбирались приближенно.

Во время цунами 22.05.1960 г. наибольшие амплитуды отмечались в камчатских бухтах (например, мыс Крюгера: 4м – как по натурным, так и по модельным данным), а также на восточном побережье Курильских островов. На о. Парамушир заплеск составил 3 м [4], а по модельным данным - 2.9 м. Максимальные амплитуды волн, для пунктов, где отсутствуют натурные данные,

по модели наблюдаются на западном побережье Камчатки (около 1.1-1.2 м). В Авачинской бухте, вследствие узкого входа и обширной акватории, высота цунами не превышала 3 метров. На территории Халактырского пляжа (место отдыха горожан) максимальная высота подъема воды достигала 15 метров (по информации ФГБУ «Камчатское УГМС»). Анализ натуральных данных цунами 27.02.2010 г. показывает, что наибольшая амплитуда волн, достигших российского побережья, была около 1м и отмечалась на островах Шикотан (Церковная бухта) и Парамушир (Северо-Курильск).

В ходе проведенного моделирования получено детальное распределение максимальных амплитуд волн двух Чилийских цунами, в том числе для мест, где отсутствуют данные о заплесках и данные мареографов. Максимальные амплитуды отмечались на восточном побережье Камчатки (до 7 метров для 1960 года и до 0.8 метра для 2010 года), а также на побережье Курильских островов (до 4.7 метра для 1960 и до 1.1 метра для 2010 года). Амплитуда волн цунами от чилийских землетрясений на юго-западном побережье Камчатки достигала 1.4 м, в то время как северо-западное побережье не было затронуто даже более мощным событием 1960 года. События 1960 и 2010 годов слабо затронули западные границы Охотского моря, максимальные волны наблюдались в районе Магадана (до 1.7 метра (ГМС Ушки) для 1960 года и до 0.4 метра для 2010 года), в то время как на побережье Хабаровского края волны не превышали 0.3 метра (поселок Охотск) для 1960 года и 0.1 (поселок Новая Иня) для 2010 года. Анализ модельных данных показывает, что амплитуды волн для побережья Хабаровского края близки у двух событий. Цунами 1960 года не затронуло некоторые населенные пункты (Николаев-на-Амуре, села Тугур, Чумикан), в то время как волны цунами 2010 года достигали нескольких сантиметров. Воздействие цунами 1960 и 2010 годов на российское побережье Японского моря было минимальным (амплитуды не более 0.2 м), что подтверждается как историческими данными, так и результатами моделирования.

Финансирование отсутствует.

Список литературы

- 1) Ивельская Т. Н. и др. Проявление чилийских цунами (1960, 2010 и 2014 гг.) на российском побережье Дальнего Востока // Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием. 2015. С. 287–291.
- 2) Shevchenko G. et al. The 2009 Samoan and 2010 Chilean tsunamis recorded on the Pacific coast of Russia // Pure and Applied geophysics. 2013. V. 170. P. 1511–1527.
- 3) Fritz H. M. et al. Field survey of the 27 February 2010 Chile tsunami // Pure and Applied Geophysics. 2011. V. 168. P. 1989-2010.
- 4) ITDB/WLD — Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.4 of February 17, 2023. 2023 (CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMG SB RAS, Novosibirsk).

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДА НА СТАЦИОНАРНОЙ ТРАССЕ В ЗАДАЧЕ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ

А.В. Буренин, И.Е. Осипов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева, г. Владивосток

Ключевые слова: акустическая томография, импульсная характеристика

В докладе представлены результаты натурного эксперимента, проведенного на стационарной трассе в мелком море. Цель этой работы заключается в сопоставлении вариаций времен приходов отдельных приходов импульсной характеристики с колебанием вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в течении всего эксперимента. Для этого выполнен анализ амплитудно-временной структуры импульсной характеристики волновода (ИХВ), и проведено сопоставление отдельных приходов ИХВ с лучевыми траекториями, выделены отдельных группы лучей, чьи колебания во времени связаны с колебаниями ВРСЗ. Идентификация отдельных групп приходов проведена с помощью численного моделирования в лучевом приближении. Натурные исследования проводились на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН м. Шульца в 2006-2007 годах. В качестве излучателя использовался широкополосный пьезокерамический излучатель. Излучатель установлен в одном метре от дна при общей глубине места 40 метров. Приемник, аналогично, установлен в одном метре, глубина места 43 метра. Расстояние между излучающей и приемной системами составляет 2098 м. Во время экспериментов каждый час измерялись вертикальные распределения скорости звука. Для зондирования среды использовался фазоманипулированный М-последовательностью сигнал (несущая 2.5 кГц, 511 символов, 4 периода на символ).

Методика обработки полученной информации основывалась на вычислении взаимно-корреляционной функцией (ВКФ) между излученным и принятым сигналом. Далее, рассчитывается огибающая ВКФ, которая является оценкой импульсной характеристики волновода (ИХВ) с разрешением по времени соответствующим параметрам зондирующего сигнала.

В ВРСЗ можно выделить три слоя. Первый слой приповерхностный, хорошо прогретый, близкий к изоскоростному слой волновода до 10 с значением скорости звука 1508 м/с. Второй слой это слой термоклина от 10 до 20 метров. В нём отмечается отрицательный градиент и значение скорости звука изменяется от 1508 до 1460 м/с. Этот слой является самым динамичным. И, третий, придонный слой, значение скорости звука в нем практически постоянное 1460 м/с. В ИХВ выделяются два вида приходов: первая группа, приходов сконцентрирована в интервале от 1.425 до 1.44 с и ассоциирована с рефрагированными лучами, идущими в придонном слое; вторая группа, приходов, лежит в более широком временном интервале от 1.4 до 1.48 с. Вторая группа лучей, распространяется по всей толщ волновода, отражаясь от морской поверхности. Вариации во времени этой группы лучей связаны с колебанием в вертикальной плоскости термоклина.

Данная работа является продолжением исследования изменчивости гидрофизических полей акустическими методами [1-3]. В работе проведен анализ амплитудно-временной структуры ИХВ. С помощью численного моделирования выделены отдельные группы приходов акустической энергии в точке приёма.

Работа выполнена в рамках госбюджетной тематики ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: АААА-А20-120031890011-8); «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: 0211-2021-0002). Анализ

и интерпретация результатов проводились в рамках НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования», № гос. регистрации 123072000039-5.

Список литературы

- 1) В.А. Акуличев, Ю.Н. Моргунов, Д.С. Стробыкин. Экспериментальные исследования сезонной изменчивости температурных полей на шельфе Японского моря акустическими методами. // Акустический журнал, 2010, том 56, No 2, с. 218–220;
- 2) Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин. Экспериментальные исследования влияния прилива на формирование акустического поля на стационарной трассе в шельфовой зоне Японского моря. // Акустический журнал, 2008, том 54, No 4, с. 587-588
- 3) Ю.Н. Моргунов, Ю.А. Половинка, Д.С. Стробыкин. Экспериментальные измерения и численное моделирование влияния сезонных вариаций поля скорости звука в области шельфа на амплитудно-временную структуру акустических импульсов. // Технические проблемы освоения Мирового океана, 2007, том 2, с. 219-224.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ВЕТВЕЙ МАЛЬВИНСКОГО ТЕЧЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

Остроумова С.А.¹, Фрей Д.И.^{1,2,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь

³Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Ключевые слова: Мальвинское течение, спутниковая альтиметрия, Субантарктический фронт, абсолютная динамическая топография

Антарктическое циркумполярное течение (АЦТ) является самым мощным течением в Мировом океане. В его структуре выделяют три основных фронта: Субантарктический, Полярный и Южный фронты АЦТ. Самый северный из них, Субантарктический фронт, проходит через пролив Дрейка, огибает банку Бёрдвуд и Мальвинские острова и поворачивает на север вдоль континентального склона Южной Америки. Часть Субантарктического фронта от банки Бёрдвуд на 55° ю.ш. до 38° ю.ш. принято называть Мальвинским течением. Натурные измерения термохалинных характеристик и скоростей течения проведённые Институтом океанологии им. П.П. Ширшова показывают, что в районе 45° ю.ш. Мальвинское течение существует в виде двух узких струй, прибрежной (шириной 20 км) и глубоководной (шириной 150 км) [1]. Взаимодействие прибрежной ветви Мальвинского течения с континентальным склоном Южной Америки образует апвеллинг, что делает это район одним из важнейших промысловых районов юго-западной Атлантики. Еще одним важным с точки зрения динамики вод районом юго-западной Атлантики является зона конfluenceции Мальвинского и Бразильского течений, в которой образуется множество вихрей, которые влияют на перенос тепла океаном и определяют термохалинную структуру вод исследуемого региона [2].

Как правило, для анализа пространственных характеристик Мальвинского течения используется спутниковая альтиметрия, интерполированная на регулярную сетку. Помимо ряда преимуществ, этот инструмент исследования обладает недостатками: может сглаживать скорости течений, не показывать узкие ветви течений и не фиксировать быстрые изменения течений во времени. Поэтому, в данной работе сделан акцент на исследование пространственной изменчивости тонкой кинематической структуры обеих ветвей Мальвинского течений на основе данных вдольтрековой альтиметрии. Эти спутниковые данные обладают пространственным разрешением 6.2 км вдоль трека и временным разрешением 9 дней 21 час 58 минут. Для анализа пространственно-временной изменчивости выбраны треки спутников Topex/Poseidon, Jason-1,2,3 пересекающие Мальвинское течение в поперечном потоку направлении. Вдольтрековые спутниковые данные с 1993 по 2020 гг. взяты с ресурса Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu/>, дата обращения 29.11.2021) из массива данных SEALEVEL_GLO_PHY_L3_MY_008_062 (уровень обработки L3), содержащего данные аномалий уровня моря.

Абсолютная динамическая топография (АДТ) постоянно меняется, особенно в районе северной струи АЦТ, поэтому определение положения ветвей Мальвинского течения по фиксированным изолиниям уровня моря требует постоянного обновления этих критериев. Исследуемый в настоящей работе участок трека альтиметров находится в зоне восходящего тренда со скоростью от 0 до 2 мм/год (среднее значение для Мирового океана на данный момент составляет 2.94 ± 0.05 мм/год [3]). В данной работе положение Мальвинского течения определялось в местах максимума градиента АДТ. Таким образом, получена независимая методика определения положения струй Мальвинского течения по данным альтиметрии на всем протяжении течения, а также исследована их пространственная и временная изменчивость. Полученные результаты дополняют данные

натурных наблюдений, получаемые в экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова в юго-западную Атлантику.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 22-77-10004.

Список литературы

- 1) Frey D.I., Piola A.R., Krechik V.A. et al. Direct measurements of the Malvinas Current velocity structure // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021. – Т. 126. – №. 4. – С. <https://doi.org/10.1029/2020JC016727>
- 2) Frey D.I., Kubryakov A.A. Dynamic Structure of Eddies of the Brazil-Malvinas Confluence Zone Revealed by Direct Measurements and Satellite Altimetry // Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023. – Т. 128. – №. 11. – С. <https://doi.org/10.1029/2023JC019957>
- 3) Fang M., Zhang J. Basin-scale features of global sea level trends revealed by altimeter data from 1993 to 2013 // Journal of oceanography, 2015. – Т. 71. – №. 3. – С. 297-310. <https://doi.org/10.1007/s10872-015-0289-1>

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ И ЛЕДОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ С УСВОЕНИЕМ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Панасенкова И.И.^{1,2}, Фомин В.В.^{1,2,3}, Дианский Н.А.^{1,3,4}

¹Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

³Институт вычислительной математики им. Г. И. Марчука РАН, г. Москва

⁴Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: западно-Арктические моря, краткосрочный прогноз, усвоение данных наблюдений, спутниковые данные.

В основе технологии прогнозирования гидрометеорологических и ледовых характеристик лежит российская трехмерная σ -модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1] в версии Западно-Арктических морей России с пространственным разрешением 2.5–2.7 км. Расчетная область INMOM полностью охватывает Белое, Баренцево, Печорское и Карское моря, а на севере – арх. Шпицберген, арх. ЗФИ и арх. Земля Франца-Иосифа. Модель позволяет рассчитывать основные характеристики морской среды (температуру, соленость, плотность, скорость и направление течений, колебания уровня моря, скорость звука и др.). Для расчета ледовых характеристик используется включённая в INMOM модель динамики-термодинамики морского льда [2].

Для задания атмосферного воздействия в модели INMOM используются данные оперативных прогнозов, полученные с помощью атмосферной модели COSMO-Ru в версии ENA с пространственным разрешением 6.6 км (COSMO-Ru6), которые хранятся на суперкомпьютере XC40-LC в ГВЦ Росгидромета.

Алгоритм совместного усвоения доступных спутниковых данных по температуре поверхности моря (ТПМ) и сплоченности ледяного покрова на основе метода ансамблевой оптимальной интерполяции (EnOI) реализован с использованием программного комплекса DART (Data Assimilation Research Testbed, <https://dart.ucar.edu/>) [3], который подключается к модели INMOM в виде отдельного компонента. Так, при усвоении в системе DART используются результаты расчетов, полученные с помощью модели INMOM, т.н. модельные состояния, которые включают в себя поля температуры, солености, сплоченности и толщины морского льда. Методика усвоения с помощью системы INMOM-DART заключается в следующем: сначала готовится ансамбль модельных состояний в формате DART, далее в DART усваиваются доступные данные наблюдений и получаются поля анализа (скорректированные модельные состояния), которые используются как начальные состояния для расчета краткосрочного прогноза по модели INMOM. В качестве элементов ансамбля использовались состояния модели INMOM на дату прогноза, рассчитанные в ретроспективном режиме за период с 1997 г. по 2021 г. Количество элементов ансамбля полагалось равным 25.

В работе проведены расчеты гидротермодинамических и ледовых характеристик в квазиоперативном режиме (анализ и прогноз на последующие 72 часа) с использованием описанной выше версии модели INMOM и атмосферного воздействия COSMO-Ru6 за период с 01.08.2022 г. по 01.10.2023 г. с совместным усвоением спутниковых данных наблюдений ТПМ и сплоченности ледяного покрова с помощью системы усвоения DART методом EnOI. Дополнительно был проведен расчет за тот же временной период без усвоения данных наблюдений, необходимый для оценки точности и эффективности работы алгоритма усвоения.

В качестве усваиваемых данных использовались данные спутниковой ТПМ европейской службы CMEMS (SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001) (Copernicus Marine Environment

Monitoring Service) [marine.copernicus.eu] с разрешением 0.05° по широте и долготе и данные о сплоченности ледяного покрова AMSRE/AMSR2, предоставляемые университетом Бремена в полярной стереографической проекции с разрешением 6.25 км. Усвоение ТПМ и сплоченности льда проводилось раз в сутки (каждые 00:00 ч.). Полученное поле анализа использовалось в качестве начальных данных при расчете прогноза по модели INMOM на 72 ч.

Показано, что усвоение данных наблюдений по ТПМ и сплоченности ледового поля в модели INMOM позволяет значительным образом улучшить модельное решение путем его корректировки относительно доступных данных наблюдений, и тем самым приблизить решение к реальному состоянию. По результатам расчетов прослеживается сезонная изменчивость среднеквадратичного отклонения (СКО) рассчитанных значений ТПМ и сплоченности ледового поля. В весенне-летний период наблюдается рост СКО ТПМ как в Баренцевом, так и в Карском морях, наибольшие значения СКО достигаются в августе. Это, в основном, обусловлено сезонной изменчивостью ТПМ, которая выше в летний период. В летний период, в случае более медленного таяния льда, будет наблюдаться меньшая интенсивность в проникновении тепла в верхний слой моря и, соответственно, более медленное, относительно наблюдаемого, повышение температуры воды, и, наоборот, в случае более быстрого таяния льда в модели. Таким образом, следует отметить важность и необходимость корректного расчета потоков тепла, соли и импульса на границе вода-воздух с учетом ледовых условий (вода-лед-воздух).

Усвоение помогает уменьшить СКО рассчитанной ТПМ на 70-80% относительно расчета без усвоения данных измерений в период активного изменения температуры (в весенне-летний период). При этом вклад в уменьшение СКО при воспроизведении ТПМ вносит как усвоение ТПМ, так и усвоение сплоченности льда. Так, подтверждается целесообразность и эффективность использования разработанного алгоритма усвоения в модели INMOM. Усвоение сплоченности льда по спутниковым данным позволяет существенным образом повысить точность расчетов ледовых характеристик в прикромочной области и в областях с интенсивным таянием льда. Так, в Баренцевом море СКО в период максимального развития льда уменьшается на 60-70%, а в Карском море – на 40-50%. Большая подвижность кромки льда приводит к большей изменчивости СКО в Баренцевом море.

Работа выполнена в рамках плана НИОКТР тема № АААА-А20-120021890121-5 (Разработка и усовершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрометеорологических характеристик акваторий Мирового океана, морей и морских устьев рек России). Численные расчеты проведены на суперкомпьютере XC40-LS ФГБУ «ГВЦ Росгидромета».

Список литературы

- 1) Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
- 2) Яковлев Н.Г. Восстановление крупномасштабного состояния вод и морского льда Северного Ледовитого океана в 1948-2002 гг. Часть 1: Численная модель и среднее состояние // Известия РАН, ФАО, 2009, Т. 45, № 3, С. 1-16.
- 3) Castruccio F.S., Karspeck A.R., Danabasoglu G., Hendricks J., Hoar T., Collins N., Anderson J.L. An EnOI-based data assimilation system with DART for a high-resolution version of the CESM2 ocean component // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020, 12, e2020MS002176, <https://doi.org/10.1029/2020ms002176>

ТРОПОСФЕРНЫЕ ПРЕДИКТОРЫ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫЕ ФАЗЫ ЭНЮК ПО ДАННЫМ ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Панасик А.В.¹, Собаева Д.^{1,2}, Зюляева Ю.А.^{2,3}

¹Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

Ключевые слова: стратосферно-тропосферное взаимодействие, планетарные волны, ЭНЮК.

Самыми яркими и интенсивными проявлениями стратосферно-тропосферного взаимодействия являются внезапные стратосферные потепления (ВСП). При ВСП происходит разрушение стратосферного полярного вихря (СПВ), которое приводит к резкому повышению температуры в полярной стратосфере. Было показано, что тропосферная динамика реагирует на ВСП [1], например, отступанием основных шторм-треков в Северном полушарии на юг [2]. При этом в умеренных широтах возрастает вероятность экстремальных погодных условий, на фоне вторжения холодных арктических воздушных масс, которое приводит к сильным похолоданиям. Резкое похолодание в начале января в 2024 г. в центральной части европейской территории России так же может объясняться ВСП [3].

Влияние тропосферных процессов на динамику стратосферы осуществляется посредством вертикального распространения квазистационарных планетарных волн (ПВ). Источником данных волн являются крупномасштабная орографическая неоднородность и температурный градиент между океанами и континентами. В Северном полушарии активность ПВ намного выше, чем в Южном полушарии.

Также на пространственную структуру и динамику распространения ПВ в умеренных широтах могут оказывать влияние волны Россби, которые формируются во время событий Эль-Ниньо в тропической зоне Тихого океана.

В современных исследованиях нет расхождений по поводу отклика стратосферного полярного вихря на положительную моду ЭНЮК, Эль-Ниньо (ЭН). Было показано, что в годы с событиями ЭН вихрь ослабевает относительно нейтральных лет. Однако касательно отклика на отрицательную фазу ЭНЮК (Ла-Нинья, ЛН) в работах существуют расхождения. Некоторые численные эксперименты показывают, что во время ЛН вихрь в среднем сильнее, чем в нейтральные годы [4]. В то время как в работах, основанных на анализе данных наблюдений, частота внезапных стратосферных потеплений в годы ЛН и ЭН сравнима, и вихрь в ЛН слабее, чем в нейтральную фазу ЭНЮК [5].

В данной работе был проведен сравнительный анализ частоты повторяемости ВСП в годы с ЛН и ЭН по данным идеализированных численных экспериментов на платформе Isca. Также в экспериментах были выявлены регионы-предикторы ВСП.

Было показано, что вихрь ослабевает относительно нейтральной фазы ЭНЮК как в эксперименте ЭН, так и в эксперименте ЛН. По сравнению с контрольным экспериментом, ВСП наблюдается в 3 раза чаще в ЭН эксперименте и в 2 раза чаще в ЛН. Максимальные различия в интенсивности стратосферного полярного вихря между ЭН и контрольным экспериментами наблюдаются в период ранней зимы (ноябрь–декабрь), в то время как между ЛН и контрольным — во второй половине зимнего периода (январь–февраль). Анализ проводился на основе 6 индексов, характеризующих интенсивность полярного вихря и позволяющих идентифицировать ВСП. Было показано, что некоторые индексы приводят к недооценке частоты ВСП в раннюю зиму.

Для различных экспериментов были выявлены регионы тропосферных прекурсоров ВСП: как для ЭН, так и для ЛН эксперимента выделяется регион южнее Берингова пролива, но в зависимости от эксперимента различается знак аномалии геопотенциала в этой области. Анализ трехмерных потоков волновой активности (потока Пламба) для различных экспериментов показал, что механизм тропосферно-стратосферного взаимодействия, предложенный в работе [5], на модельных данных не работает. Увеличенная частота ВСП в ЛН экспериментах может объясняться интенсификацией Скандинавского антициклона.

-

Список литературы

- 1) Thompson D.W.J., Baldwin M.P., Wallace J.M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction // *Journal of Climate*. 2002. V. 15. № 12. P. 1421–1428.
- 2) Kidston J. et al. Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather // *Nature Geoscience*. 2015. V. 8, № 6. P. 433–440.
- 3) <https://www.weatherandradar.co.uk/weather-news/minor-ssw-event-impacts-of-a-weak-polar-vortex-0d86718d-e56f-4be1-b2ec-b30af19ed971>
- 4) Tyrrell N.L., Koskentausta J.M., Karpechko A.Y. Sudden stratospheric warmings during El Niño and La Niña: sensitivity to atmospheric model biases // *Weather and Climate Dynamics*. 2022. V. 3, № 1. P. 45–58.
- 5) Garfinkel C.I. et al. Why might stratospheric sudden warmings occur with similar frequency in El Niño and La Niña winters? // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. V. 117, № D19.

ЦУНАМИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Пилик Д.И.¹, Медведев И.П.², Цуканова Е.С.²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, Японское море.

Японское море является частью Тихоокеанского огненного кольца – самого сейсмически активного региона в мире, где происходит более 80% всех землетрясений Земли. Сильные и неглубокие землетрясения приводят к генерации волн цунами, которые достигают берегов России и Японии. Одними из самых разрушительных цунами внутри акватории Японского моря являются: Ниигатское 1964 г. ($M = 7.5$), Монеронское 1971 г. ($M = 7.5$), Япономорское 1983 г. ($M = 7.7$), Окуширское 1993 г. ($M = 7.8$), Невельское 2007 г. ($M = 6.2$). Данная работа посвящена исследованию особенностей сильнейших цунами, произошедших в Северной части Японского моря: Монеронского и Невельского.

Монеронское землетрясение произошло 05.09.1971 в 18:35 UTC в Татарском проливе около острова Монерон. Магнитуда землетрясения составила 7.5, глубина гипоцентра – 15–20 км. В результате землетрясения возникли волны цунами высотой 30–40 см, которые были зафиксированы в Невельске, Холмске и на станции Вакканай. По визуальным наблюдениям высота волны цунами достигала 2 м.

Невельское землетрясение произошло 02.08.2007 в 02:37 UTC вблизи города Невельск. Магнитуда события была относительно слабая для возбуждения цунами – 6.2, но, тем не менее, очаг с глубиной 10 км породил волны высотой 40–50 см (мареограф в Холмске). По визуальным наблюдениям высота волн достигала 1–1.8 м.

В настоящем исследовании при помощи численного гидродинамического моделирования были рассчитаны волны цунами от этих двух землетрясений. Расчет распространения волн производился при помощи численной гидродинамической модели И.В. Файна [1], схожей с моделью TUNAMI [2]. Для батиметрии использовалась база глубин GEBCO, 2014. Были созданы сейсмические источники землетрясений и рассчитаны вертикальные смещения дна, пересчитанные в возмущение уровня моря. Верификация модели проводилась с помощью мареограмм береговых пунктов наблюдений за уровнем моря на российском и японском побережьях. С помощью численного моделирования было воссоздано распределение высот цунами на российском побережье Японского моря для обоих событий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-17-00313.

Список литературы

- 1) Fine I.V., Kulikov E.A., Cherniawsky J.Y. Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from observations and numerical modelling // Pure and Applied Geophysics, 2013. – V. 170. – P. 1295–1307.
- 2) Imamura F. Review of tsunami simulation with a finite difference method // In: Long-wave runup models. / Eds. Yeh H. et al. World Scientific Publ., Singapore, 1996. – P. 25–42.
- 3) Тихонов И.Н., Ломтев В.Л. Мелкофокусная сейсмичность и тектонические особенности Японского моря // Тихоокеанская геология, 2013. – Т. 32. – №. 5. – С. 66–77.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НЕЙРОСЕТЕВОЙ ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОЙ ВЫСОТЫ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ ПО ДАННЫМ СУДОВОГО НАВИГАЦИОННОГО РАДАРА ЗА СЧЕТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ НА СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Резвов В.Ю.^{1,2}, Криницкий М.А.^{1,2}, Голиков В.А.^{1,2}, Тилинина Н.Д.²

¹ Московский физико-технический институт, г.Долгопрудный

² Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, г.Москва

Ключевые слова: ветровое волнение, судовой навигационный радар, значимая высота ветрового волнения, спектр Пирсона-Московица, синтетические радарные снимки, предварительное обучение, машинное обучение, глубокое обучение, искусственные нейронные сети, сверточные нейронные сети.

Судовые навигационные радары обеспечивают безопасную морскую навигацию, обнаруживая различные препятствия. Помимо своей основной задачи, необработанные радиолокационные изображения позволяют извлечь такие важные характеристики ветрового волнения, как значимая высота (significant wave height, SWH). Классический метод определения SWH по радарному снимку основан на Фурье-анализе временных рядов радиолокационных данных и линейном дисперсионном соотношении.

Помимо классического подхода, обработка радарных снимков также может производиться потенциально более быстрыми и не зависящими от конкретного радара методами. В группе методов, основанных на искусственном интеллекте (ИИ), функциональная связь между радиолокационным изображением и соответствующим значением SWH аппроксимируется путем обучения модели на значительном объеме данных.

В настоящем исследовании мы используем радиолокационные изображения, полученные судовым навигационным радаром, и соответствующие характеристики ветрового волнения, измеренные волновыми буями Spotter. Данные были получены в рамках четырех экспедиций в Атлантическом и Северном Ледовитом океанах, проведенных Институтом океанологии им. П.П.Ширшова РАН [1].

Проблема недостатка пар реальных данных в настоящей работе решается путем синтеза искусственных радарных снимков с заданным распределением SWH. Используемый подход основан на Фурье-преобразовании белого шума, отфильтрованном с помощью спектра развитого ветрового волнения Пирсона-Московица [2], для получения реалистичной модели поверхности океана [3]. Чтобы преобразовать синтетическую поверхность океана в радиолокационное изображение, мы используем приближение геометрической оптики для определения затененных областей и угла наклона морской поверхности к радарному лучу [4]. Полученные таким образом радарные снимки демонстрируют реалистичность в визуальном восприятии.

В этой работе мы демонстрируем преимущества использования предварительного обучения сверточных искусственных нейронных сетей для оценки SWH по реальным изображениям, полученным судовым навигационным радаром.

На первом этапе мы используем описанную выше методологию получения реалистичных синтетических радиолокационных изображений и генерируем синтетический набор данных. На этой выборке мы обучаем модель, которая реконструирует синтетические изображения, используя подход обучения без учителя. После этого на втором этапе мы используем предварительно обученную часть модели реконструкции для построения и обучения регрессионной модели, аппроксимирующей SWH по синтетическому изображению. Затем, на третьем этапе, предварительно обученные веса регрессионной модели используются для обучения той же модели на реальном наборе данных.

Мы сравниваем результаты, полученные с помощью предварительного обучения на синтетических данных, с качеством аппроксимации простой регрессионной модели SWH без предварительного обучения [5].

Результаты обучения модели реконструкции в подходе обучения без учителя показывают, что архитектура с пропускными и остаточными соединениями способна воспроизводить гармоническую структуру ветровых волн. Предварительно обученная регрессионная модель показывает хорошие результаты как на синтетических, так и на реальных наборах данных. Мы объясняем это тем, что сверточная часть моделей реконструкции и регрессии не теряет волновую информацию и успешно извлекает мелкомасштабную структуру радиолокационного изображения. В результате, предварительно обученная сверточная нейронная сеть показывает лучшее качество аппроксимации SWH, чем простая модель без предварительного обучения [5].

Данное исследование было выполнено в рамках Программы развития МФТИ "ПРИОРИТЕТ 2030".

Список литературы

- 1) Tilinina, N. et al. Wind waves in the North Atlantic from ship navigational radar: SeaVision development and its validation with the Spotter wave buoy and WaveWatch III // *Earth Syst. Sci. Data.* – 2022. – Т. 14. – С. 3615–3633.
- 2) Pierson, W., Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii // *Journal of geophysical research.* – 1964. – Т. 69. – № 24. – С. 5181-5190.
- 3) Mastin, G.A. et al. Fourier Synthesis of Ocean Scenes // *IEEE Computer Graphics and Applications.* – 1987. – Т. 7. – № 3. – С. 16–23.
- 4) Ludeno, G., Serafino, F.J. Estimation of the Significant Wave Height from Marine Radar Images without External Reference // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2019. – Т. 7. – № 12. – С. 432–443.
- 5) Krinitskiy, M. et al. Estimating Significant Wave Height from X-Band Navigation Radar Using Convolutional Neural Networks // *Moscow University Physics Bulletin.* – 2023. – Т. 78 – Suppl. 1. – С. S128–S137.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛЮМА РЕКИ ЛЕНА И ДРУГИХ ВОСТОЧНО-СИБИРСКИХ РЕК В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД В 2018-2021 ГОДАХ

Рогожин В.С.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{2,3}, Коновалова О.П.¹, Калениченко В.О.¹, Кирюшина М.В.¹, Шабалин Н.В.¹

¹ Центр Морских Исследований МГУ имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), г. Москва

² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

³ Московский Физико-Технический Институт (МФТИ), г. Долгопрудный

Ключевые слова: Арктика, Восточно-Сибирское море, опресненный слой, термохалинная структура, сокращение площади льда.

В последние десятилетия в Арктике происходит интенсивное сокращение площади льда в теплый период года. Особенно значимые изменения регистрируются в морях восточной Арктики, где увеличение продолжительности безледного периода может приводить к усилению ветрового воздействия на поверхностный слой моря. Одним из следствий данного процесса может стать перестройка структуры опресненного поверхностного слоя, который формируется стоками рек Лена, Колыма, Индигирка и распространяется на большие площади в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. Подобная изменчивость площади распространения опресненных вод в условиях сокращения площади ледяного покрова может оказать влияние на состояние региональных экосистем морей восточной Арктики. К сожалению, труднодоступность данного региона значительно уменьшает возможности для его исследования. Особенно эта проблема актуальна для северо-восточных регионов Восточно-Сибирского и Чукотского морей, что заметно по степени изученности данного района: значительная часть исследований сосредоточена в его западной и южной частях [1], [2]. Исследования, проведенные в данной работе, направлены на восполнение пробелов о гидрологической структуре северо-восточной части Восточно-Сибирского моря в безледный период. Также, на основе натурных данных - значений температуры и солености исследуемой акватории - выявлено аномальное распространение плюма реки Лена и других Сибирских рек в акватории Восточно-Сибирского моря в 2018-2021 годах. В ходе выполнения данной работы были проанализированы результаты измерений температуры и солености, выполненных в августе-сентябре 2018-2021 гг. в северо-восточной части Восточно-Сибирского моря. В этот период было выполнено 20 гидрологических станций к западу и северу от о. Врангеля. Кроме натурных данных, производилось исследование ветровых условий в период проведения работ на основе данных о скорости и направлении ветра, на основе данных реанализа ERA-5 с шагом сетки 0.25 ° и временным шагом 1 час. По результатам анализа проведенных измерений термохалинных характеристик морской воды в северо-восточной части Восточно-Сибирского моря в августе 2019 г. и сентябре 2018 и 2021 г. были выявлена значительная изменчивость площади плюма Сибирских рек за исследуемый период. Так, в 2019 г. практически всю площадь исследуемой акватории занимали воды с крайне низкими для Восточно-Сибирского моря значениями солености от 18 до 28 psu. Наименьшие значения солености (18-25 psu) наблюдались к юго-западу и западу от о. Врангеля. Стоит отметить, что подобные гидрологические условия, а именно расположение границы зоны опресненных вод в 25 psu вблизи побережья острова Врангеля, ранее не регистрировались натурными изменениями. В свою очередь, в 2018 и 2021 годах в исследуемой акватории минимальные значения солености вблизи о. Врангеля составляли 26-28 psu, что значительно выше, чем 2019 году. При изучении вертикальной термохалинной структуры исследуемой акватории также отмечаются значительные различия между исследованиями, проведенными в разные годы - в 2019 году по вертикальному распределению солености отчетливо заметно влияние материкового стока на южную часть исследуемой акватории - изолиния в 25 psu, являющаяся границей распространения распресненных вод, располагается на глубинах 7-10 метров, что совпадает с вертикальными масштабами плюма

реки Лена в Лаптевых и Восточно-Сибирском морях, представленными в [3]. В 2018 и 2021 годах поверхностный слой моря был гораздо более однороден, и распределение солености не соответствовало представлениям о вертикальной структуре опресненного слоя в Восточно-Сибирском море. Основными причинами таких различий в термохалинной структуре моря за исследуемый период являются ветровое воздействие, а также таяние морского льда - высокие значения солености в исследуемой акватории в 2021 г. объясняются воздействием ветров северных румбов на акваторию Восточно-Сибирского моря, затрудняя распространение плюма Сибирских рек на восток. В свою очередь, аномально низкие значения солености в 2019 году объясняются дополнительным распреснением акватории за счет постепенного таяния массива морского льда в августе 2019 года, непосредственно перед началом проведения полевых работ.

Таким образом, было зафиксировано смещение восточной границы плюма Восточно-Сибирских рек более чем на 500 км на восток по сравнению с максимальным распространением плюма в предыдущие десятилетия [3], [4], [5], а также выявлены возможные причины данного аномального распреснения по сравнению с исследованиями, проведенными в 2018 и 2021 годах. В целом, это соотносится с результатами исследований, проведенными в ходе экспедиции АМК-78 в 2019 году к западу от исследуемой акватории [3], когда распространение плюма реки Лена было одним из максимальных за тридцатилетний исследуемый период.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 23-17-00087.

Список литературы

- 1) Пипко И.И., Семилетов И.П., Пугач С.П. О карбонатной системе вод Восточно-Сибирского моря // Доклады Академии наук. 2005. Вып. 402, № 3. С. 398–401.
- 2) Anderson L.G., Björk G., Holby O., Jutterström S., Mörtz C.M., O'Regan M., Pearce C., Semiletov I., Stranne C., Stöven T., Tanhua T., Shelf-basin interaction along the East Siberian Sea // Ocean Science. 2017. № 13(2). P.349–363. <https://doi.org/10.5194/os-13-349-2017>.
- 3) Osadchiv A., Frey D., Spivak E., Shchuka S., Tilinina N., Semiletov I. Structure and Inter-Annual Variability of the Freshened Surface Layer in the Laptev and East-Siberian Seas During Ice-Free Periods // Front. Mar. Sci. 2021. 8:735011 <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.735011>.
- 4) Dmitrenko I.A., Kirillov, S.A. and Tremblay, L.B., The long-term and interannual variability of summer fresh water storage over the eastern Siberian shelf: Implication for climatic change. // Journal of Geophysical Research. 2008. № 113(C3). <https://doi.org/10.1029/2007JC004304>.
- 5) Janout M.A., Hölemann J., Laukert G., Smirno, A., Krumpfen T., Bauch D., Timokhov L. On the variability of stratification in the freshwater-influenced Laptev Sea Region. // Frontiers in Marine Science. 2021. № 7. P. 543489. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.543489>.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЛОЩАДИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕНИСЕЙСКОГО ЗАЛИВА

Рогожин В.С.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{2,3}

¹ Центр Морских Исследований МГУ имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), г. Москва

² Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), г. Москва

³ Московский Физико-Технический Институт (МФТИ), г. Долгопрудный

Ключевые слова: Енисейский залив, Карское море, ветровой апвеллинг, температура поверхности моря, опресненный слой.

Енисей – наиболее полноводная (годовой объем стока составляет более 630 км³) из всех рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Большая часть стока реки концентрируется в Енисейском заливе - крупном эстуарии, в северной части которого располагается зона смешения речных и морских вод. Особенности распространения речного стока и его динамика в Енисейском заливе могут оказывать значительное влияние на формирование плюма Оби-Енисея – одной из ключевых водных масс, формирующих поверхностный слой Карского моря [1]. На структуру вод Енисейского залива оказывают влияние множество факторов, основными из которых являются изменчивость стока реки Енисей, ветровое воздействие, приливы, процессы ледообразования и ледотаяния.

Данная работа посвящена изучению структуры и динамики крупномасштабной зоны апвеллинга, периодически возникающей в акватории Енисейского залива под воздействием восточных и северо-восточных ветров, что регистрируется на основе данных дистанционного зондирования - спутниковой температуры поверхности моря. За период с 2002 по 2023 гг. было выявлено 11 случаев возникновения крупномасштабной зоны ветрового апвеллинга в исследуемом районе. Наиболее обширный по площади и продолжительный по времени случай был зафиксирован в 2015 году, когда под воздействием ветрового апвеллинга оказалась вся северная часть Енисейского залива на протяжении более двух недель. Формирование зоны апвеллинга в Енисейском заливе может оказать значительное влияние на гидрологическую структуру и динамику вод данной акватории.

В качестве исходных материалов для изучения случаев формирования зоны ветрового апвеллинга в Енисейском заливе были использованы данные значений температуры поверхности моря, полученные со спутников MODIS Terra/Aqua, NOAA-20/VIIRS и Suomi NPP/VIIRS за период с 2002 по 2023 г. Возможность использования данных о температуре поверхности моря для определения опресненных вод в поверхностном слое заливов и морей Северного Ледовитого океана была неоднократно подтверждена их сравнением с натурными данными, полученными в ходе экспедиционных исследований [1-5]. Для исследования влияния ветровых условий были проанализированы данные атмосферного реанализа ERA5 - скорость и направление ветра на уровне моря - с разрешением 0.25° и временным шагом 1 час.

По результатам анализа спутниковых данных, за период 2002-2023 гг. было выявлено 11 случаев апвеллинга разного масштаба в акватории Енисейского залива и прилегающей акватории Карского моря длительностью от 1 до 14 дней: 19.08.2002, 07-08.08.2006, 01-08.2007, 27.08.2009, 31.07 - 03.08.2013, 26.07 - 10.08.2015, 15.07.2016, 29.07 - 03.08.2019, 14.08 - 17.08.2020, 24.07.2022, 12.08.2023. Минимальная площадь апвеллинга составляла ~ 674 км², максимальная - 14197 км². Как было указано ранее, наиболее продолжительным по времени, среди вышеперечисленных случаев, был апвеллинг, продолжавшийся с 26 июля по 10 августа 2015 года, на примере которого рассмотрен процесс формирования данного явления. В большинстве случаев, процесс формирования апвеллинга начинался вблизи Енисейского залива, в районе Таймырского побережья Карского моря, под воздействием ветров восточного и северо-восточного направления длительностью не менее суток и скоростью не менее 6-7 м/с. В дальнейшем, при продолжении ветрового воздействия длительностью от 2 до 3 суток, площадь зоны апвеллинга значительно

увеличивалась на север, достигая 7500 км². При ветровом воздействии длительностью свыше 3 суток, зона формирования апвеллинга расширялась изначально на прибрежную часть Енисейского залива, а затем и на всю северную часть исследуемой акватории, достигая максимальной площади в 13-14 тыс. км². В случае изменения направления ветра с восточных румбов на западные или снижения скорости ветра, происходит постепенное (в течение 1-3 суток) уменьшение площади апвеллинга и восстановление потока теплых енисейских вод на север.

Таким образом, на основе данных температуры поверхности моря, полученных со спутников MODIS Terra/Aqua, NOAA-20/VIIRS и Suomi NPP/VIIRS было выявлено несколько случаев формирования прибрежного ветрового апвеллинга в Енисейском заливе и прилегающих водах Карского моря. На примере наиболее значительного по площади апвеллинга, произошедшего в июле-августе 2015 года, подробно описан процесс его формирования. Определено, что длительность конкретного случая апвеллинга напрямую зависит от длительности и скорости воздействия ветра восточных румбов, преимущественно северо-восточного направления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки, соглашение № 075-15-2022-1233 (13.2251.21.0184).

Список литературы

- 1) Osadchiev A.A., Izhitskiy A.S., Zavialov P.O., Kremenetskiy V.V., Polukhin A.A., Pelevin V.V., Toktamysova Z.M. Structure of the buoyant plume formed by Ob and Yenisei river discharge in the southern part of the Kara Sea during summer and autumn // *Journal of Geophysical Research*. 2017. V. 122, № 7. P. 5916–5935. <https://doi.org/10.1002/2016JC012603>.
- 2) Banzon V., Smith T.M., Steele M., Huang B., Zhang H. Improved Estimation of Proxy Sea Surface Temperature in the Arctic // *J. Atmos. Oceanic Technol.* 2020. V. 37. P. 341–349. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-19-0177.1>.
- 3) Castro S.L., Wick G.A., Eastwood S., Steele M.A., Tonboe R.T. Examining the Consistency of Sea Surface Temperature and Sea Ice Concentration in Arctic Satellite Products // *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 2908. <https://doi.org/10.3390/rs15112908>.
- 4) Osadchiev A., Frey D., Spivak E., Shchuka S., Tilinina N., Semiletov I. Structure and Inter-Annual Variability of the Freshened Surface Layer in the Laptev and East-Siberian Seas During Ice-Free Periods // *Front. Mar. Sci.* 2021. 8:735011 <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.735011>.
- 5) Osadchiev A., Konovalova O., Gordey A. Water Exchange Between the Gulf of Ob and the Kara Sea During Ice-Free Seasons: The Roles of River Discharge and Wind Forcing // *Front. Mar. Sci.* 2021. 8:741143. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.741143>.

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО ЛЬДА В XXI ВЕКЕ ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ СМIP6

Семенов В.А.^{1,2}, Романенко В.А.^{1,3}.

¹Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, Российская Федерация

²Институт географии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

³Научно-исследовательский вычислительный центр Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Ключевые слова: СМIP6, DСPP, временные ряды, тренды, межмодельный разброс, площадь морского льда.

Изучены характеристики арктического морского льда по данным климатических моделей проекта СМIP6 [3] и по данным декадных климатических прогнозов (DСPP) [4].

В качестве исходных данных использованы данные по концентрации морского льда из архива CEDA [1] проектов СМIP6 (35 моделей) и DСPP (10 моделей) для всей территории Арктики за период 1980 – 2030гг., а также данные реанализа ERA5 [2]. DСPP содержит dсppA-hindcast блок, состоящий из ретроспективных десятилетних прогнозов, и из dсppB-forecast блока, представляющего собой экспериментальные десятилетние прогнозы в квазиреальном режиме времени. DсppA-hindcast данные имеют временные рамки с 1980 по 2020-е гг., dсppB-forecast данные по 2030г. В данных декадных прогнозов моделей EC-Earth3-CC и EC-Earth3-HR имеются пропуски некоторых лет, поэтому их временные ряды ненепрерывны. СМIP6 данные состоят из блока historical (до 2014г.) и сценария ssp585 (2015 - 2030гг.).

В качестве характеристик арктического морского льда в работе представлены временные ряды ее площади как по данным СМIP6 [3], так и по данным DСPP [4], временные ряды основных статистических характеристик ансамбля моделей СМIP6 (среднее, медиана, 5-й и 95-й процентиля) за март и сентябрь, за самый наиболее и наименее ледовитый месяц, соответственно. Также в работе исследованы распределение средней по ансамблю моделей СМIP6 осредненной за 2000 - 2020гг. площади льда за март и сентябрь, средние по ансамблю трендов площади льда за 2021 - 2030гг. за те же месяцы и межмодельный разброс трендов площади льда за 2021 - 2030гг. за рассматриваемые месяцы, полученные путем расчета стандартного отклонения по ансамблю моделей средней за исследуемый промежуток времени площади льда.

Согласно СМIP6 и DСPP проектам, большинство моделей воспроизводит довольно резкое сокращение площади ледового покрова к 2030г., причем в сентябре оно сильнее, чем в марте. По некоторым моделям видно, что к концу рассматриваемого периода значительная часть Арктики станет свободной ото льда. Однако отмечается ярко выраженный межмодельный разброс, порядка $1.3 * 10^7 \text{ км}^2$ в марте и более $6 * 10^6 \text{ км}^2$ в сентябре, что говорит о существенной неопределенности в воспроизведении климатическими моделями характеристик льда.

В марте среднее по моделям значение площади льда чуть больше медианного, что говорит о положительной асимметрии воспроизведения площади льда моделями СМIP6, что выражено в завышении ими значений концентрации льда. В сентябре медианное значение среднеансамблевой площади льда близко к средней, то есть модели в равной степени как завышают, так и занижают значения концентрации морского льда. Стоит отметить, что площадь льда по данным реанализа ERA5 близка к среднеансамблевой, однако, в марте она чуть ниже средней и медианной, что подтверждает положительную асимметрию воспроизведения моделями площади льда, а в сентябре максимально близка к ним.

Наибольшая площадь льда наблюдается в восточно-сибирском и североамериканском секторах, где отсутствует отепляющее влияние теплых течений, а, например, в районах Гренландии и Канадского арктического архипелага протекают ветви холодного Трансарктического течения,

там ледовый покров наблюдается даже в сентябре. В Норвежском, Баренцевом и Карском морях, в результате действия теплого течения Гольфстрим и его различных ветвей, площадь льда минимальна, либо вовсе отсутствует как в сентябре, так и в марте. Как было представлено выше, в 2021 – 2030гг. произойдет резкое сокращение площади ледового покрова в Арктике.

В марте наблюдается повсеместное снижение площади ледового покрова равными темпами на всей акватории Арктики. В сентябре темп снижения площади льда выше, чем в марте. Зона наиболее ускоренного таяния наблюдается в восточно-сибирской и северо-американской акваториях Арктики, где и так максимальное сосредоточение льда.

Наибольшие межмодельные различия в воспроизведении площади ледового покрова в марте наблюдаются в Баренцевом и на севере Норвежского морей. Именно здесь существует большая неопределенность в моделировании концентрации льда между моделями. В сентябре максимальный межмодельный разброс приурочен к районам существования сплошного льда, где так же можно увидеть большие различия в воспроизведении площади ледового покрова и его концентрации между различными моделями.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ 23-47-00104

Список литературы

- 1) <https://data.ceda.ac.uk/badc/cmip6/data/>
- 2) <https://www.copernicus.eu/en>
- 3) <https://confluence.ecmwf.int/display/COPSRV/CMIP6%3A+Global+climate+projections>
- 4) George J. Boer et al. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6, Geoscientific Model Development, 2016. P. 3751–3777.

ПРИМЕНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ

Рыбалко А.Д.¹, Мысленков С.А.², Архипкин В.С.²

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

² *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

Ключевые слова: ветровое волнение, частотные спектры, классификация, пространственная изменчивость, Черное море, Азовское море.

Морское волнение — одна из основных характеристик, определяющих взаимодействие океана и атмосферы и передачу механической и тепловой энергии. Важной прикладной задачей является исследование характеристик волнения и их изменчивости в локальных областях Мирового океана, учитывая особенности ветровых характеристик и геометрии исследуемых бассейнов. Черное и Азовское моря активно используются прибрежными странами, что предъявляет повышенные требования к информации о ветровом волнении.

Наиболее полные сведения о поле ветрового волнения несут в себе частотные и частотно-направленные спектры. Кроме интегральных параметров и волновых систем, спектры позволяют изучать распределение энергии по частотам (и направлениям), что является необходимым для решения ряда инженерных задач. Исследование климатической изменчивости спектров позволяет судить о режиме ветрового волнения в исследуемых акваториях, и потенциально — прогнозировать изменчивость. В целом, выделяются два подхода в изучении волнового климата на основе спектров: осреднение за продолжительный период (например, [1]) и описание спектров, например, с помощью выполнения классификации, с последующим расчетом повторяемости набора признаков (классов) [2].

Целью данной работы является изучение пространственно-временной изменчивости частотных спектров ветрового волнения в Черном и Азовском морях на основе разработанной классификации и анализа повторяемости классов.

Для достижения цели был выполнен расчет частотных спектров в исследуемых морях с помощью спектральной волновой модели WAVEWATCHIII за период с 1982 по 2020. Для описания процесса генерации волн использовалась схема ST6, нелинейное взаимодействие в модели задавалось параметрической схемой DIA, а учет придонного трения описывался стандартной схемой JONSWAP. Расчет частотных спектров проводился на нерегулярной вычислительной сетке с высоким пространственным разрешением. Диапазон частот спектра составил 36 интервалов от 0.03 до 0.84 Гц. Шаг по направлениям был задан фиксированным и составил 10°. В качестве основных входных данных задавались поля ветра из реанализов NCEP/CFS и NCEP/CFSv2. Для Азовского моря дополнительно задавались поля концентрации морского льда из реанализа ESA SST CCI and C3S, скорректированных с помощью экспертных ледовых карт Гидрометцентра. В результате была получена база данных частотных спектров ветрового волнения за 38 лет с шагом по времени 3 ч. Шаг по пространству составил 10–15 км для открытой части Черного моря, 6 км для открытой части Азовского моря и 1–1.5 км м вдоль всего побережья обоих морей.

Разработка классификации для анализа изменчивости спектров выполнялась с помощью агломеративного кластерного анализа с использованием евклидова расстояния [3] на основе выборки из частотных спектров в 10 точках Черного и Азовского морей, соответствующих разным режимам ветрового волнения. Были получены 23 класса, отличающихся друг от друга по спектральной энергии, частоте основного пика и форме спектра. Распределение каждого частотного спектра из всей базы данных за 39 лет по классам осуществлялось с помощью расчета расстояния Махаланобиса [4] между спектром, который необходимо классифицировать, и эталонами по

модифицированной формуле. Подробное описание методики представлено в [5]. Полученная классификация предлагает подробное описание развития спектров ветрового волнения и применима не только для открытого океана, но и для внутренних морей.

При рассмотрении пространственной изменчивости было получено, что во всех точках спектральной сетки в Черном и Азовском морях за рассматриваемый период времени наибольшую повторяемость имеет класс с наименьшими значениями спектральной плотности, до $0.5 \text{ м}^2/\text{Гц}$ (класс 1), причем доля таких спектров в районах с глубинами до 200 м повсеместно составляет более 50%. Вторые по повторяемости классы в исследуемых акваториях также характеризуются низкими значениями спектральной плотности (до $1 \text{ м}^2/\text{Гц}$) и высокими значениями частот основного пика (0.18 Гц и более). Для Азовского моря характерны в среднем более высокие частоты, чем в Черном море. При рассмотрении пространственной изменчивости структуры повторяемости классов выделяются узкие прибрежные зоны обоих морей. В них вторые по повторяемости классы характеризуются более низкой частотой основного пика, чем свойственно для остальных районов акваторий. Классы с наибольшей спектральной плотностью и низкими частотами пиков (0.1 Гц и ниже) были выявлены только в глубоководных районах Черного моря.

Рассмотрение межгодовой изменчивости в исследуемых акваториях показало, что ранжирование наиболее повторяемых классов из года в год на большей части акватории не изменяется. Несмотря на некоторую изменчивость в пропорциях повторяемости классов, тренды обнаружены не были. Кроме того, в работе рассмотрены изменчивость классов в зависимости от направления распространения волн в репрезентативных точках.

Предложенная классификация может быть использована для исследования ветрового волнения в других районах Мирового океана.

Работа выполнена в рамках Соглашения 169-15-2023-002.

Список литературы

- 1) Amarouche K., Akpinar A. Long-term characterisation of directional wave spectra in the Black Sea and the Sea of Azov // *Applied Ocean Research*. 2023. V. 141. P. 103783.
- 2) Бухановский А.В., Лопатухин Л.И., Чернышёва Е.С. Климатические спектры ветрового волнения, включая экстремальные ситуации // *Океанология*. 2013. Т. 53, №. 3. С. 304–312.
- 3) Everitt B.S. *Cluster Analysis* – Halsted-Heinemann: London, 1980
- 4) Mahalanobis P.C. On the generalized distance in statistics // *Sankhyā: The Indian Journal of Statistics, Series A* (2008-). 2018. V. 80. P. 1–7.
- 5) Rybalko A, Myslenkov S., Arkhipkin V. Seasonal variability of wind wave spectra in the Black Sea and Sea of Azov. Supplement v. *Oceanology*. 2023. (in print).

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОБЛАСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛЮМОВ КРУПНЫХ АРКТИЧЕСКИХ РЕК В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД ГОДА

Савин А.С.^{1,2}, Осадчиев А.А.^{1,2}

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: речной плум, Арктика, поверхностная соленость океана.

В результате перемешивания речного стока с морскими водами образуется опресненная водная масса — речной плум. Он, как правило, представляет из себя тонкий поверхностный слой, который, тем не менее, может иметь большую протяженность по площади. Моря российской Арктики подвержены значительному влиянию речного стока многочисленных рек, крупнейшие из которых это Обь, Енисей и Лена. Стоки этих рек формируют протяженный по площади опресненный поверхностный слой, во многом определяющий циркуляцию крупных арктических водных масс, их стратификацию, перенос растворенных в них веществ, их продуктивность и другие физико-химические и биологические свойства. Таким образом, информация о структуре и изменчивости речных плумов необходима для понимания процессов, происходящих в Северном Ледовитом океане.

Одним из важнейших индикаторов для определения структуры речных плумов является соленость морской воды. Она измеряется как в судовых океанологических экспедициях с использованием гидрологических зондов, так и методами дистанционного зондирования. Спутниковые измерения солености активно развиваются в последние годы, однако качество восстановления поверхностной солености океана в высоких широтах, характеризующихся низкими температурами и значениями солености, заметно снижается относительно наиболее типичных районов Мирового океана. В настоящей работе структура речных плумов определяется на основе данных солености, полученных из модели, разработанной и верифицированной для арктических районов [1]. Модель построена с использованием методов машинного обучения и представляет из себя улучшение стандартного алгоритма SMAP. Использование алгоритмов машинного обучения позволило существенно улучшить точность определения ПСО в морях российской Арктики по сравнению со стандартными продуктами SMAP.

Настоящая работа посвящена исследованию сезонной и межгодовой изменчивости области распространения плумов крупных арктических рек в безледный период года. На основе данных поверхностной солености океана количественно и качественно оценивается изменчивость границы и внутренней структуры плумов Оби–Енисея и Лены с начала июня до конца ноября. Рассматривается влияние ветрового воздействия и объема речного стока на пространственное положение и площадь области распространения речных плумов. Помимо этих основных, также учитываются региональные факторы, такие как строение береговой линии, структура устья реки, взаимодействие плумов крупных рек с соседними более мелкими и другие [2]. Поскольку соленость морской воды при ее замерзании определяет физические и механические характеристики образовавшегося морского льда, особое внимание в работе уделяется положению и структуре опресненных водных масс непосредственно перед ледообразованием.

Результаты исследования представляют важность для понимания физических и биологических процессов, происходящих в Карском, Лаптевых и Восточно–Сибирском морях, а также открывают путь к дальнейшему исследованию крупных водных масс во всем арктическом регионе в безледный период года.

Работа выполнена при поддержке программы развития Московского физико-технического института Приоритет-2030 и проекта РНФ 23-17-00087.

Список литературы

- 1) Криницкий М.А., Савин А.С., Осадчиев А.А. Региональный алгоритм спутниковой солёности поверхности океана для морей российской Арктики // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых учёных, г. Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 г. – Санкт-Петербург: Своё издательство, 2023. – С. 161–162. ISBN 978-5-4386-2269-7
- 2) Osadchiev A. et al. Structure and inter-annual variability of the freshened surface layer in the Laptev and East-Siberian seas during ice-free periods // *Frontiers in Marine Science*, 2021. – Т. 8. – С. 735011.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ВИХРЕЙ В ПРИКРОМОЧНОЙ ЗОНЕ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ НЕРОЙННОЙ СЕТИ YOLO

Сандалюк Н.В.¹, Хачатрян Э.М.², Lozou P.L.³

¹ *Московский физико-технический институт, Москва*

² *UiT, The Arctic University of Norway, Tromsø*

³ *National Technical University of Athens, Athens*

Ключевые слова: мезомасштабные вихри, Арктика, прикромочная зона, нейронные сети, YOLO

Изучение океанических вихревых структур на основе данных дистанционного зондирования является одним из наиболее актуальных направлений в современной океанологии. Океанические вихри способны захватывать большие объемы воды, тепла, соли и биогенов. Одиночный вихрь может перемещать триллионы тон воды и десятки тераджоулей тепла из места его генерации до места диссипации [1]. За последние 30 лет основным источником информации о мезомасштабных вихрях являлась спутниковая альтиметрия. Разработка различных алгоритмов автоматической идентификации вихрей на основе анализа полей аномалий уровня позволило ученым накопить большое количество данных о физических и кинематических характеристиках вихрей [1, 2]. Однако минимальный размер идентифицируемых на основе спутниковой альтиметрии вихрей ограничен пространственным разрешением данных спутниковой альтиметрии. Тем не менее, мезомасштабные и субмезомасштабные вихри, которые не разрешаются полями спутниковой альтиметрии, вносят существенный вклад в перераспределение тепла, соли и биогенов и оказывают значительное влияние на региональный климат. Данные процессы по-прежнему остаются недостаточно изученными. Это особенно актуально для полярных регионов ввиду их удаленности, недостаточного количества натуральных наблюдений, наличия ледового покрова и значительно меньшему радиусу деформации Россби.

Прикромочная ледовая зона (ПЛЗ) — это транзитная зона от открытого моря к плотному дрейфующему льду. ПЛЗ является зоной повышенной динамической активности, для нее характерны процессы активного взаимодействия атмосферы и океана и повышенная биологическая продуктивность [3]. Характерной особенностью ПЛЗ является повышенная генерация вихрей. Вихревая активность в ПЛЗ вносит существенный вклад в процессы обмена массой, теплом и энергией, а также оказывают существенное влияние на положение кромки льда и биологическую продуктивность в пределах ПЛЗ.

Данные спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА) обладают значительно более высоким разрешением по сравнению с данными альтиметрии и позволяют изучать вихревые структуры гораздо меньших горизонтальных масштабов. Данные РСА активно используются в современной океанологии для исследования мезомасштабных и субмезомасштабных вихрей [4, 5]. Однако, до настоящего момента, идентификация вихрей на основе снимков РСА в ПЛЗ осуществлялась исключительно методом визуального анализа спутниковых изображений. Такой подход неизбежно включает в себе ряд ошибок и не позволяет накопить большой массив данных даже для отдельного района.

Для реализации задачи по автоматизации процесса идентификации вихрей мы изучили возможности применения архитектуры глубокой сверточной нейронной сети YOLOv5. Существует несколько различных вариантов модели YOLOv5: nano, small, medium, large, x-large. Наш подход заключается в тонкой настройке предварительно обученных моделей YOLOv5 на заранее подготовленном и размеченном наборе данных. В процессе обучения модель тренируется предсказывать ограничительные рамки (bounding boxes) вокруг вихрей. Модель идентифицирует вихри на основе снимков РСА высокого разрешения, полученных для района пролива Фрама. Также модель разделяет вихри на 2 основных класса: циклоны и антициклоны.

Для оценки точности моделей использовались стандартные метрики accuracy, precision и recall, а также mean average precision (mAP) с пороговым значением доверительного интервала в диапазоне от 50 % до 95 %. Также дополнительно для оценки эффективности отдельных моделей использовался визуальный анализ результатов. На основе тестирования была определена модель, продемонстрировавшая наилучший результат: YOLOv5 small.

Экспериментальные результаты, полученные на валидационном и тестовом наборах данных, убедительно продемонстрировали эффективность выбранной модели для идентификации субмезомасштабных и мезомасштабных вихрей с различной структурой, а также для разделения выделенных вихрей на циклоны и антициклоны.

Представленное исследование закладывает основу для автоматизированной идентификации вихрей в ПЛЗ по данным РСА.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ 23-77-01090.

Список литературы

- 1) Chelton D.B., Schlax M.G., Samelson R.M. Global observations of nonlinear mesoscale eddies // *Progress in Oceanography*, 2011. – V. 91, Iss. 2. – P. 167–216.
- 2) Faghmous J., Frenger I., Yao Y., Warmka R., Lindell A., Kumar V. A daily global mesoscale ocean eddy dataset from satellite altimetry // *Sci. Data*, 2015. – V. 2. – 150028.
- 3) Johannessen J.A., Johannessen O.M., Svendsen E., Shuchman R., Manley T., Campbell W.J., Josberger E.G., Sandven S., Gascard J.C., Olaussen T. Mesoscale eddies in the Fram Strait marginal ice zone during the 1983 and 1984 Marginal Ice Zone Experiments // *J. Geophys. Res. Ocean*, 1987. – V. 92. – C. 6754–6772.
- 4) Kozlov I.E., Artamonova A.V., Manucharyan G.E., Kubryakov A.A. Eddies in the Western Arctic Ocean From Spaceborne SAR Observations Over Open Ocean and Marginal Ice Zones // *J. Geophys. Res. Ocean*, 2019. – V. 124. – C. 6601–6616.
- 5) Kozlov I.E., Atadzhanova O.A. Eddies in the Marginal Ice Zone of Fram Strait and Svalbard from Spaceborne SAR Observations in Winter // *Remote Sens*, 2022. – V. 14, Iss. 134.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ТИХООКЕАНСКОЙ АКВАТОРИИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА И СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ В ВЕСЕННЕ-ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2017 - 2021 ГГ.

Свергун Е.И., Зимин А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: радиолокационные изображения, короткопериодные внутренние волны, внутренние приливные волны, массовая приливная сила плавучести, скорость ветра, градиент плотности, восточнокамчатская популяция минтая, Тихий океан, шельф Камчатского полуострова.

Короткопериодные внутренние волны (КВВ) широко распространены на акватории Тихого океана, прилегающей к полуострову Камчатка и северным Курильским островам. Анализ результатов спутниковых радиолокационных наблюдений за календарный год в сочетании с данными глобальной приливной модели [1] позволил выявить, что районы частой встречаемости КВВ относительно стабильны, несмотря на значительную изменчивость абсолютного количества проявлений КВВ в течение года, а доминирующим механизмом генерации КВВ является дезинтеграция внутренних приливных волн (ВПВ) за критической широтой. Однако ещё не сформированы представления о межгодовых особенностях изменчивости поля КВВ у берегов Камчатского полуострова и, соответственно, отсутствуют представления о стабильности районов их частой встречаемости в межгодовом аспекте. Исследуемая акватория также является нерестовым районом восточнокамчатской популяции минтая. В глубоководных каньонах Авачинского залива распределение икры по горизонтам может изменяться [2]. Влияние на вертикальные движения икры могут оказывать ВПВ [3, 4]. Таким образом, изучение закономерностей межгодовой изменчивости районов частой встречаемости КВВ, как индикаторов генерации и распада внутреннего прилива, является весьма актуальной задачей.

Проявления короткопериодных внутренних волн регистрировались на радиолокационных изображениях (РЛИ) со спутника Sentinel 1 (А и В) в С-диапазоне и в режиме съёмки IW с пространственным разрешением 20 метров и шириной полосы обзора 250 км. Спутниковые снимки были загружены с сайта Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>). Всего за период с марта по август 2017-2021 гг. доступно 1190 РЛИ. Поверхностные проявления КВВ регистрировались на РЛИ на в виде чередующихся светлых и темных дугообразных полос. Определялись географические координаты положения проявления, количество волн в пакете, длина лидирующего гребня, средняя длина волны, направление распространения. Рассчитывалась частота встречаемости, как отношение количества проявлений КВВ к количеству РЛИ в ячейках, с размером $0,2^\circ$ по широте и $0,24^\circ$ по долготе. «Горячие точки» определялись как области, где частота встречаемости проявлений КВВ превышает фоновую (0,1) как минимум в два раза [1].

Дополнительно привлекались среднемесячные значения скорости ветра, полученные из реанализа ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) и вертикальное распределение температуры и солёности продукта GLORYS12V1 из реанализа Copernicus (https://resources.marine.copernicus.eu/products-detail/GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030/) по которым определялось вертикальное распределение плотности морской воды и определялся ее максимальный вертикальный градиент. По локальным максимумам массовой приливной силы плавучести [5], которая является функцией баротропного приливного потока, стратификации и градиента глубины, выявлялись очаги генерации ВПВ. Для расчёта привлекались данные глобального приливного атласа TPXO9 [6], продукта GLORYS12V1 реанализа Copernicus и батиметрия ETOPO1 (<https://www.ncei.noaa.gov/products/etopo-global-relief-model>).

На 1190 РЛИ с марта по август 2017 – 2021 годов было зарегистрировано 1441 проявлений КВВ. Пакеты проявлений КВВ содержали от 3 до 23 волн в пакете с длиной волны от 86 до 1550 метров, а длина лидирующего гребня варьировалась от 4 до 118 км. Наибольшая частота встречаемости проявлений КВВ отмечалась на юго-восточном шельфе полуострова Камчатка около м. Лопатка и м. Синявина, в Авачинском заливе у м. Шипунский, а также в Кроноцком заливе у м. Средний. Максимальное число проявлений волн наблюдалось в 2019 году и составляло 367, а минимальное – в 2021 году и составляло 161. С марта по апрель в исследуемом регионе регистрируется минимальное количество проявлений КВВ, которое за все годы, кроме 2019, не превышает 20. В 2019 году в весенние месяцы обнаружено до 50 проявлений КВВ. Максимальное количество проявлений КВВ отмечается в июле для 2019 и 2020 годов, и в августе для 2017, 2018 и 2021 года.

Для «горячей точки» у м. Шипунский было выявлено, что в весенний период малому количеству проявлений КВВ соответствуют минимальный градиент плотности и максимальная скорость ветра. В летний период, напротив, градиент плотности обострён, а скорость ветра минимальна. Массовая приливная сила плаучести показывает, что не только в летний, но и в весенний период, несмотря на слабую стратификацию вод, выявляются очаги генерации ВПВ около основных районов нереста минтая. Это указывает на активность генерации и распада ВПВ в весенний период, что может влиять на вертикальное распределение икринок и личинок исследуемой популяции рыб. Однако в весенний период значительные скорости ветра ограничивают отображение проявлений КВВ на морской поверхности, и не удаётся выявить связь между проявлениями КВВ и очагами генерации ВПВ, в отличие от летнего периода, когда в области очагов генерации ВПВ регистрируется до 80% проявлений КВВ.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-17-00174

Список литературы

- 1) Svergun E.I., Sofina E.V., Zimin A.V., Kruglova K.A. Seasonal variability of characteristics of nonlinear internal waves in the Kuril-Kamchatka region by Sentinel 1 data // *Continental Shelf Research*. 2023. Vol. 259.104986. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2023.104986>.
- 2) Варкентин А.И., Саушкина Д.Я. О некоторых вопросах воспроизводства минтая в тихоокеанских водах, прилегающих к Камчатке и северным Курильским островам в 2013–2022 гг // *Труды ВНИРО*. 2022. Т. 189. С. 105–119. <https://doi.org/10.36038/2307-3497-2022-189-105-119>.
- 3) Garwood, J.C., Musgrave R.C., Lucas A.J. Life in internal waves // *Oceanography*. 2020. V. 33(3). P. 38–49.
- 4) Stashchuk N., Vlasenko V., Internal Wave Dynamics Over Isolated Seamount and Its Influence on Coral Larvae Dispersion. *Front. Mar. Sci.*, 2021, 8:735358. doi: 10.3389/fmars.2021.735358
- 5) Baines P.G. On internal tide generation models // *Deep Sea Res. Part A*. 1982 V.29 (3) P. 307–338. doi: 10.1016/0198-0149(82)90098-X.
- 6) Egbert G. D., Erofeeva S. Y. Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides // *J. Oceanic Atmos. Technol.* 2002. V. 19. P. 183 – 204. doi:10.1175/1520-0426(2002)0192.0.CO;2.

О ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ОБЛАСТЕЙ ВОДОПОДОБНОГО ДНА АКУСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ В МЕЛКОВОДНЫХ РАЙОНАХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Сидоров Д.Д.¹, Боджона С.Д.^{1,2}, Луньков А.А.^{1,2}

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

Ключевые слова: акустика мелкого моря, арктический шельф, водоподобные донные осадки, акустическое зондирование

В акустике мелкого моря большое внимание уделяется определению структуры дна, которая может оказывать существенное влияние на дальнейшее (волноводное) распространение звука. В частности, одной из наиболее сложных задач крупномасштабного акустического мониторинга Арктического шельфа является адекватный учет влияния морского дна. Востребованность такого мониторинга вызвана уменьшением площади многолетнего льда и возникшими в этой связи проблемами с контролем климатических изменений и экологией. Помимо обозначенных проблем к этому мелководному району появился и повышенный интерес, связанный с рекордными залежами углеводородного сырья. Здесь же находятся важные транспортно-логистические узлы, включая Северный морской путь, что в целом также диктует необходимость разработки и применения подобного рода мониторинга. Инженерная сейсморазведка и бурение верхних слоев донных отложений [1] показали, что слой осадков имеет сильно неоднородную структуру. Полученные данные позволили выявить области водоподобных осадков, где скорость звука в дне близка к скорости звука в воде. При этом плотность донных осадков остается больше, чем плотность воды. Важно отметить, что низкая скорость звука в осадках является индикатором наличия в них газовых пузырьков. При распространении звука над водоподобными областями значительная часть энергии проникает в дно из водного слоя и звук аномально затухает. Такое явление связано с тем, что контраст скоростей звука между двумя средами (вода-дно) становится незаметным.

Обнаружение областей водоподобных осадков может иметь важное значение для разработки акустического мониторинга. Трехмерная сейсморазведка является информативным, но в то же время затратным методом исследований. С ее помощью сложно осуществить быструю оценку параметров верхнего слоя дна. Таким образом, разработка новых методик, позволяющих дистанционно и оперативно определять наличие, положение и протяженность областей водоподобных осадков, является актуальной задачей.

В настоящей работе получены аналитические и численные (моделирование) оценки характера распространения звука как для тонального источника звука, так и для широкополосного (до 1 кГц). Источник звука и вертикальная приёмная цепочка гидрофонов разнесены на расстояние много больше глубины волновода. Наличие локальной области водоподобных осадков на акустической трассе между источником и приёмной системой приводит к появлению осцилляций в спектре отдельных составляющих звукового поля – волноводных мод [2]. Причём расстояние от источника до этой области в случае прямо пропорционально числу локальных максимумов в спектре в заданном диапазоне частот. Определив число максимумов при распространении звука в прямом N и обратном N' направлениях и зная общую длину трассы R , можно рассчитать дистанцию от источника звука до водоподобной области согласно следующему выражению

$$r_S = R / (1 + N' / N).$$

Не менее важной задачей является оценка протяженности данной области. Подобные оценки удобно проводить с использованием такой характеристики, как средние по глубине потери при дальнем

распространении звука TL . Данная характеристика описывает зависимость спадающей средней интенсивности звука с расстоянием. В случае волноводов с водоподобными осадками наблюдается линейная зависимость потерь при распространении TL от протяженности Δr_{wl} области таких осадков

$$TL = TL_0 + 10(\gamma_{wl} \lg(e)) \Delta r_{wl},$$

где TL_0 – потери в отсутствие водоподобных осадков на трассе, γ_{wl} – коэффициент затухания звука в области водоподобных осадков. При этом длина звуковой волны должна быть сравнима с глубиной волновода. Данное линейное соотношение носит универсальный характер и слабо зависит от распределения скорости звука в водном слое.

Обнаруженные закономерности могут быть важны при дистанционном зондировании протяженных мелководных акваторий с дном, имеющим отдельные локализованные участки, где скорость звука близка к скорости звука в воде. Они позволят с большой надежностью определять места выхода природного газа и образования покмарков.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10121, <https://rscf.ru/project/22-72-10121/>.

Список литературы

- 1) Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терехина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // Акуст. журн. Т. 64, № 3. С. 342-358.
- 2) Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А. Широкополосное звуковое поле в мелководном волноводе с неоднородным дном // Акуст. журн. Т. 69, № 5. С. 608-619.

ВЛИЯНИЕ ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЫ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ АТЛАНТИЧЕСКОЙ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Силеверстова О.С.¹, Башмачников И.Л.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Фонд "Нансен-центр", г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Атлантическая меридиональная океаническая циркуляция, глобальный ре-анализ, Северная Атлантика, межгодовая изменчивость.

Атлантическая меридиональная океаническая циркуляция (АМОЦ) представляет собой сложную систему горизонтальных и вертикальных движений вод Атлантического океана, уменьшающую контраст между водными массами экваториальных и полярных широт. Конвекция в океане обусловлена уменьшением плавучести воды на поверхности, главным образом в полярных широтах – здесь водные массы охлаждаются, их плотность увеличивается, из-за чего они погружаются вниз. В этих областях конвекции формируются глубинные воды Северной Атлантики. Далее глубинные воды вновь выходят на поверхность благодаря апвеллингу в Южном океане, а также вертикальному турбулентному теплообмену в тропических широтах. В Атлантическом океане существуют две ячейки циркуляции, исходящие от обоих полюсов. Ячейка, берущая начало в Северной Атлантике, образует «верхнюю ячейку» Меридиональной океанической циркуляции (МОЦ). Верхняя ячейка АМОЦ охватывает верхние 4 км океана. Более глубокая «нижняя ячейка» берет начало из Антарктиды и поставляет жидкость в придонный слой океана.

Теплые воды Гольфстрима, текущие на северо-восток, встречаются с холодными, текущими на юг водами Лабрадорского течения. Большинство приповерхностных вод Лабрадорского течения соединяются с Гольфстримом, образуя Северо-Атлантическое течение к востоку от Большой Ньюфаундлендской банки. Данный район слияния вод (37–47° с.ш., 40–55° з.д.) оказывает существенное влияние на АМОЦ и называется «транзитной зоной» [1].

Известно, что АМОЦ демонстрирует большую изменчивость во внутригодовых и сезонных временных масштабах и гораздо меньшую изменчивость в межгодовых и десятилетних временных масштабах [2]. Аномалии плавучести верхних слоев (0-1000 м) в районе Транзитной зоны играют значительную роль в изменчивости АМОЦ. Транзитная зона – важный регион, контролирующей изменчивость Североатлантической циркуляции. Это место, где динамика океана, включая геострофическую адвекцию, вихри и диффузию, играет важную роль в бюджете тепла верхнего квазиоднородного слоя океана (ВКС). В Транзитной зоне встречаются рециркулирующие воды из субтропического круговорота и транзитные воды, связанные с АМОЦ. Аномалии плавучести в Транзитной зоне могут передаваться как субтропическому, так и субполярному круговороту. Кроме того, Транзитная зона не является пассивным каналом для аномалий плавучести, поскольку непосредственно в этом регионе происходят сильные изменения свойств водных масс. В Транзитной зоне имеется значительная низкочастотная изменчивость температуры поверхности океана, уровня морской поверхности, а также интенсивности морских течений [3].

Целью нашей работы является анализ сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных характеристик Транзитной зоны, являющейся важным фактором изменчивости АМОЦ, от поверхности до глубин более 2000 м. В работе используются ежемесячные данные по температуре и солёности за период с 1993 по 2020 гг. глобального океанического реанализа GLORYS12V1, предоставленного Copernicus Marine Service (CMEMS). Реанализ представляет собой ассимиляцию модельных данных, рассчитанных на основе модели NEMO, а также спутниковых, натуральных измерений и данных с буёв и морских глайдеров. Данные имеют пространственное разрешение порядка 1/12° по широте и долготе и 50 уровней по вертикали. Для расчёта плотности морской воды

на основе данных по температуре и солёности использовалось эмпирическое уравнение состояния морской воды TEOS-10. Расчёт корреляции проводился между плотностью в каждой точке на глубине с 1500 до 2000 м и солёностным индексом АМОЦ, который вычислялся как среднегодовое значение солёности Атлантического океана на 45°–65° с.ш. в слое 0–1500 м [4].

Полученные результаты свидетельствуют о ярко выраженной сезонной и межгодовой изменчивости термохалинных характеристик в районе Транзитной зоны Атлантического океана. Сезонные колебания солёности варьируются от 34,5 psu в летний период до 35,0 psu в конце зимнего периода, температурные колебания – от +20,6°С в летний период до +10,5°С в зимний. Наибольшая амплитуда колебаний прослеживается в поверхностном и промежуточном слоях данного района, резко уменьшаясь с увеличением глубины. Анализ термохалинных характеристик свидетельствует о наличии межгодовых линейных трендов, наиболее отчётливо выраженных также на поверхности. В центре Транзитной зоны зафиксирована область с отрицательными значениями линейного тренда температуры до -2,5°С/28 лет, в целом для района характерны отрицательные линейные тренды солёности до -0,5 psu/28 лет. В районе Гольфстрима наблюдаются значительные положительные линейные тренды температуры до +2,5°С/28 лет, также прослеживаются положительные линейные тренды солёности около 1 psu/28 лет. В районе течения Гольфстрима на глубине 1500 м также установлена положительная корреляция между плотностью в каждой точке и солёностным индексом АМОЦ до 0,6, при этом на глубине 2000 м коэффициент корреляции достигает значения 0,7.

Актуальность данного исследования связана с тем, что АМОЦ оказывает существенное влияние на перенос кислорода и биогенных элементов с поверхности Мирового океана в нижележащие слои. Кроме того, интенсивная теплоотдача при конвекции способствует передаче тепла из океана в атмосферу, тем самым смягчая климат Европы в зимний период. Изучение механизмов изменчивости АМОЦ способствует глобальному пониманию климатических процессов, что позволит в будущем предсказывать изменчивость климата и составлять точные климатические прогнозы в глобальном масштабе.

Финансирование отсутствует

Список литературы

- 1) Buckley M. W., Marshall J. Observations, inferences, and mechanisms of Atlantic Meridional Overturning Circulation variability: A review// *Reviews of Geophysics*. Vol. 54. 2016. P. 5–63. doi:10.1002/2015rg000493
- 2) Rayner D., Hirschi J., Kanzow T., Johns W., Wrigh P., Frajka-Williams E., Bryden H., Meinen C., Baringer M., Marotzke J., Beal L., Cunningham S. Monitoring the Atlantic meridional overturning circulation//*Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. Vol. 58(17–18). 2011. P. 1744–1753. doi:10.1016/j.dsr2.2010.10.056
- 3) Zhang R. Coherent surface-subsurface fingerprint of the Atlantic meridional overturning circulation//*Geophysical Research Letters*. Vol. 35. 2008. L20705. doi:10.1029/2008GL035463
- 4) Chen X, Tung K. K. Global surface warming enhanced by weak Atlantic overturning circulation//*Nature*. Vol. 559(7714). 2018. P. 387–391. doi:10.1038/s41586-018-0320-y

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ВОД В ЗАПОВЕДНИКЕ УТРИШ В 2020-2021 ГГ. ПО ДАННЫМ ЗАЯКОРЕННОЙ ТЕРМОКОСЫ

Сильвестрова К.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: термокоса, Черное море, Утриш.

В работе исследована термическая структура вод и связанные с ней прибрежные процессы в северо-восточной части Черного моря. Температура воды измерялась на акватории Утришского заповедника при помощи заякоренной термокосы. Ранее подобные долговременные измерения проводились в других акваториях [1,4,5], однако для акватории заповедника такое исследование проведено впервые.

Термокоса, состоящая из 6–10 датчиков температуры с точностью $\pm 0,025$ °C и шагом по времени одна минута впервые была установлена на акватории заповедника в 2020 году (2). В работе использованы данные трёх периодов измерений: 31.01.20 – 21.04.20 (глубина постановки 16 м), 16.07.20– 15.03.21 (глубина постановки 20 м), 15.03.21– 19.05.22 (глубина постановки 34 м).

Для каждого периода и для каждого датчика были посчитаны средние, максимальные и минимальные значения температуры воды. Получено, что максимальное значение температуры воды (28,6 °C) зарегистрировано в приповерхностном слое в августе 2021 г.; минимум (7,7 °C) зарегистрирован на донном датчике (33м) в марте 2022 г. Проанализированы сезонные изменения температуры воды и такие явления как: апвеллинги, внутренние волны (ВВ) и суточный ход.

За время измерений на термокосу по данным расчета критерия апвеллинга [2], можно отметить события, связанные с сильным ветровым воздействием – в первый период 4 события, во второй – 3, в третий – 5. В связи с низкой температурой воды в первый период данные события не отразились в термической структуре вод. Остальные события нашли отражение в данных измерений. Самый сильный экмановский апвеллинг был зарегистрирован в сентябре 2021 года. Температура воды упала с 26 °C до 16 °C за 10 часов.

Во время измерений на различных горизонтах от 5м и до дна регистрировались ВВ с периодами от 5 минут до 20 ч. Так, например, 22.03.21 на протяжении 2-х часов на горизонте 11.2 м фиксировались колебания с периодом около 13 минут. В данном исследовании было важно показать наличие таких процессов в акватории, однако подробно ВВ не изучались.

Оценки суточного температурного хода получены по данным спектрального анализа. Для периода с августа 2020 по июль 2021 была посчитана повторяемость дней с суточным ходом. Получено, что в летние месяцы суточный ход наблюдался более 60% времени измерений, а в холодный период – менее 20% времени. Средняя амплитуда суточного хода составила 0.4-0.7°C, максимальная более 4 °C в поверхностном слое в середине июля 2021г. Необходимо отметить, что на придонных горизонтах ранее ночью наблюдалось охлаждение, что может свидетельствовать об адвективной природе колебаний, а также возможно наложение суточного хода и ВВ с инерционной частотой. Для изучения взаимодействия и отклика термической структуры вод на динамику необходимы дополнительные измерения, например, как в работе [3].

Таким образом, в работе дано описание термической структуры вод в акватории заповедника Утриш и некоторых её особенностей. Изменчивость температуры воды и ее характеристики являются важным параметром морской среды, в т.ч. при изучении экосистем прибрежной зоны. Более подробно об исследовании можно прочитать в статье [2].

Работа выполнена за счет средств госзадания номер FMWE-2024-0016.

Список литературы

- 1) Myslenkov, S.; Silvestrova, K.; Krechik, V.; Kapustina, M. Verification of the Ekman Upwelling Criterion with In Situ Temperature Measurements in the Southeastern Baltic Sea // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – 11. – 179.
- 2) Silvestrova, K., Myslenkov, S., Puzina, O., Mizyuk, A., & Bykhalova, O. Water Structure in the Utrish Nature Reserve (Black Sea) during 2020–2021 According to Thermistor Chain Data // Journal of Marine Science and Engineering. – 2023. – 11(4). – 887.
- 3) Мысленков С.А., Зацепин А.Г., Сильвестрова К.П., Баранов В.И. Использование дрейфующих буев и буксируемого профилографа для исследования течений на шельфе Черного моря // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 2014. – № 6. – С. 73-80.
- 4) Мысленков С.А., Кречик В.А., Соловьев Д.М. Анализ температуры воды в прибрежной зоне Балтийского моря по спутниковым данным и измерениям термоксы // Труды Гидрометцентра России. – выпуск 364. – 2017. – С. 159-169.
- 5) Очередник В. В., Зацепин А. Г. Цуги короткопериодных внутренних волн на шельфе Черного моря по данным измерений кластера термоксов // Морской гидрофизический журнал. – 2023. – Т. 39. – №. 5. – С. 650-670.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ УРОВНЯ ТИХОГО ОКЕАНА

Смирнов М.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: уровень океана, Тихий океан, Эль-Ниньо, Южное колебание, Перуанский апвеллинг, Индонезийское море.

Уровень океана во внетропической зоне конвергенции (ВЗК) играет важную роль в формировании процессов Эль-Ниньо-Южное колебание (ЭНЮК). При больших положительных значениях индекса SOI (South Oscillation Index), характеризующего явление Ла-Нинья, пассаты усиливаются, что приводит к значительному нагону более теплых поверхностных вод к побережью Индонезии, понижению атмосферного давления и повышению уровня океана. В это время у восточного побережья океана происходит сгон вод, усиление Перуанского апвеллинга, охлаждение поверхностных вод, повышение атмосферного давления в районе экватора и понижение уровня океана. При отрицательных значениях SOI (явление Эль-Ниньо) наблюдается обратная ситуация. Пассаты резко ослабевают, давление над Индонезией повышается, огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина устремляются на восток. Однако количественные оценки взаимосвязи морского уровня с явлениями Эль-Ниньо/Ла-Нинья и прилегающими районами океана малоизучены [1-6].

Район Перуанского апвеллинга и Индонезийского моря больше всего подвержены процессам Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Область Перуанского апвеллинга (ПА) являющаяся важнейшим рыбопродуктивным районом Мирового океана. Так, на акватории ПА, занимающей площадь около 0,02 % площади Мирового океана, добывают около 20 % мирового улова рыбы. Температура поверхностных вод здесь примерно на 5 градусов ниже, чем в зоне Эль-Ниньо. При ослаблении пассатов огромные массы теплой воды в виде волны Кельвина устремляются на восток. У восточного побережья океана большая часть этих вод поворачивает на юг и накрывает область апвеллинга, вследствие чего поверхностная температура здесь повышается примерно на 5 °С, что приводит к понижению биологической продуктивности, гибели планктона, рыб, особенно наиболее массового вида – анчоуса, птиц т. п.

В области Индонезийского моря также происходят сильные изменения во время данных явлений, температура поверхности океана во время Эль-Ниньо и Ла-Нинья также изменяется на 1-2 °С. Данный район интересен тем, что здесь находятся уровенные станции, накапливающие данные длительный период, такие как Манила (с 1901 года). Это позволяет оценить изменчивость уровня в данном районе как при помощи спутниковой альтиметрии, так и при помощи уровенных станций. Также рассматривается связь с прилегающими районами океана.

В работе [1] было выдвинуто на рассмотрение три уровенных индекса Тихого океана в зоне ЭНЮК. SL_{EN} – уровенный индекс на востоке Тихого океана в районе Nino 3+4 (координаты разреза 221° з.д. и 2,5° с.ш. - 2,5° ю.ш), SL_{SO} – уровенный индекс на западе Тихого океана вблизи Индонезийского архипелага (координаты разреза 137° в.д. и 5 - 10° с.ш), SL_{ENSO} – обобщенный уровенный индекс Тихого океана в зоне ЭНЮК, представляющий собой разность уровенных индексов на востоке и западе Тихого океана .

По полученной карте распределения коэффициента корреляции уровенного индекса SL_{ENSO} с аномалиями уровня океана в узлах сетки было выбрано несколько областей для дальнейшего анализа. Область Перуанского апвеллинга и Индонезийское море были выделены, как области, наиболее подверженные явлениям Эль-Ниньо и Ла-Нинья. Также рассматривались области прилегающие к Индонезийскому морю – Южно-Китайское, Желтое моря и область протекания мощного теплого течения Куроисио.

Проведенный анализ связи уровенных индексов с аномалиями уровня в зоне Перуанского апвеллинга показал, что отмечается наличие высокой связи уровенного индекса SL_{EN} с аномалиями

уровенной поверхности на севере района до 10^0 ю.ш. По мере продвижения на юг она уменьшается и становится не значимой, то есть влияние Эль-Ниньо на уровень океана в зоне ПА ограничивается северной зоной до 10^0 ю.ш. Южнее отклик на Эль-Ниньо в уровне океана отсутствует. Отмечается высокая связь вдоль всего побережья Южной Америки (>0.6) и уменьшение связи на удалении от береговой черты.

Район Индонезийского моря сильно подвержен влиянию как явления Эль-Ниньо, так и Ла-Нинья. Именно в этом районе проведен разрез уровня индекса, SL_{SO} . Пространственное распределение коэффициента корреляции показывает высокую связь уровня индекса с аномалиями уровня океана в исследуемом районе. Самая высокая связь наблюдается на востоке района в открытой части Тихого океана и наблюдается затухание связи в западной части Индонезийского моря.

По данным портала Laboratory for Satellite Altimetry NOAA/NESDIS/STAR были получены значения уровня прилегающих морей и проведен корреляционный анализ уровнем индексом SL_{SO} . Результаты показали наличие высокой связи как Индонезийского (0.95), так и Южно-Китайского морей (0.76). Однако Желтое море имеет меньшую связь, но наблюдается небольшой отклик на проходящие явления. Также отдельно стоит отметить зону $20 - 50^0$ с.ш. и $120 - 180^0$ в.д., где наблюдается мощное теплое течение Курошио. Данная область не имеет отклика на проходящие явления в экваториальной части Тихого океана.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Список литературы

- 1) Малинин В.Н., Смирнов М.А. Изменчивость уровня в тропической зоне Тихого океана и Эль-Ниньо — Южное колебание // Гидрометеорология и экология, 2022. — № 68. — С. 463–477. doi: 10.33933/2713-3001-2022-68-463-477.
- 2) Tarazona J., Arntz W. The Peruvian Coastal Upwelling System // Ecological Studies, 2001. — V. 144. — P. 229–244.
- 3) Серых И.В. О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология, 2021. — № 63. — С. 329–370.
- 4) Ruiqiang Din, Yu-Heng Tseng, Emanuele Di Lorenzo. Multi-year El Niño events tied to the North Pacific Oscillation // NATURE COMMUNICATIONS, 2022. doi.org/10.1038/s41467-022-31516-9.
- 5) Бондаренко А.Л., Серых И.В. О формировании явления Эль-Ниньо — Ла-Нинья Тихого океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса, 2011. — Т. 8. — № 2. — С. 57–63.
- 6) Осипов А.М., Гущина Д.Ю. Эль-Ниньо 2015–2016 гг.: эволюция, механизмы, сопутствующие удаленные аномалии // Фундаментальная и прикладная климатология, 2018. — № 3. — С. 54–81. doi:10.21513/2410-8758-2018-3-54-81.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПОД ВЛИЯНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Смирнова Д.А., Медведев И.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: сгонно-нагонные явления, Японское море, тропические циклоны, высокочастотные колебания уровня моря.

Японское море — окраинное море на западе Тихого океана, омывающее берега России, Японии, КНДР и Республики Корея. Ежегодно в летне-осенний период над акваторией проходит несколько тропических циклонов различной силы [1]. Некоторые из них достигают четвертой и пятой категорий по шкале Саффира-Симпсона. Несмотря на возможность с хорошей точностью прогнозировать погоду на несколько суток вперед, определение пути перемещения тропических циклонов остается сложной задачей. До сих пор некоторые события приводят к катастрофическим последствиям и значительным экономическим затратам. Чтобы уменьшить риски разрушения береговой инфраструктуры и количество человеческих жертв, необходимо проводить мероприятия по защите берега с учетом локальных особенностей побережья. Однако экстремальные колебания уровня моря возникают не только при прохождении тропических циклонов над акваторией, но и в результате длительного воздействия ветра определенного направления. При этом наблюдаются сгонно-нагонные явления с периодом колебаний до нескольких суток. Они приводят к затоплению низменных прибрежных территорий. Помимо низкочастотных колебаний уровня моря в бухтах и заливах возникают сейши, собственные стоячие колебания уровня моря с периодами несколько десятков минут, инфрагравитационные и ветровые волны с периодами от 2 до 7 минут и до 30 секунд соответственно [2]. Цель данного исследования заключалась в том, чтобы сформулировать основные закономерности колебаний уровня Японского моря при различных метеорологических условиях над акваторией.

Для анализа были использованы данные трех российских и японского самописцев уровня моря с 2010 года: Владивосток, Преображение, Рудная Пристань, Хамада. Разрешение данных составляет 1 см, дискретность измерений 1 минута. Поля ветра и атмосферного давления взяты из реанализа ERA5 с шагом сетки 0.25° и шагом по времени 1 ч. Информация о тропических циклонах взята с американского портала NOAA [3] и японского портала National Institute of Informatics [4]. Рассмотрено влияние одного из самых сильных одиночных тайфунов за указанный период, Санба (2012 г.), и «пары» циклонов, прошедших над Японским морем с разницей семь дней, Майсак и Хайшен (2020 г.), а также случай экстремального подъема уровня Японского моря, не зависевшего от тайфуна, в первой половине августа 2021 г.

Характер отклика уровня поверхности Японского моря на рассматриваемые события различается. Тайфун Чабя вызвал значительные низкочастотные изменения уровня моря (с периодом более нескольких часов) амплитудой до 29 см только в южной части моря, поскольку его траектория проходила через Корейский пролив и через остров Хонсю уходила в Тихий океан, почти не повлияв на уровень в центральной части моря. Пара циклонов Майсак и Хайшен над Японским морем перемещались практически по одной и той же траектории, что достаточно редко наблюдается. По данным было установлено, что Майсак вызвал самое сильное изменение уровня моря за последние 10 лет. В Рудной Пристани и Преображении наблюдались очень сильные инфрагравитационные волны, размахом до 2 м в Преображении. Во всех остальных случаях наибольший вклад в изменение уровня вносят штормовые нагоны. Максимальная амплитуда низкочастотных колебаний во время этого события достигала 87 см (в Корейском проливе, в Пусане). Подъем среднего уровня при отсутствии тайфуна в несколько раз меньше. В первой половине августа

2021 г. максимальные значения составили 27 см в Преображении. Характер низкочастотных колебаний уровня различался в южной и средней частях моря. В Хамаде подъем и падение уровня моря были резкими (со скоростями 1.4 см/ч и 2 см/ч), но незначительными. Их размах составлял 19 см. В Преображении наблюдался один четкий пик длительностью около трех суток, в Рудной Пристани — два пика, а во Владивостоке нагону предшествовал стгон. В Рудной Пристани были зафиксированы инфрагравитационные волны размахом до 1 м.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-17-00313.

Список литературы

- 1) Ли А.А., Гульченко А.М., Мезенцева Л.И. Воздействие тропических циклонов на дальневосточные моря // Комплексные исследования в рыбохозяйственной отрасли. 2022. С. 342–347.
- 2) Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. – 1993.
- 3) Портал NOAA: <https://coast.noaa.gov/hurricanes/#map=4/32/-80> (Дата обращения: 23.06.22)
- 4) Портал KITAMOTO Asanobu японского Национального института информатики (National Institute of Informatics (NII): <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/> (Дата обращения: 24.06.22)

РАЗЛИЧИЯ ТРОПОСФЕРНО-СТРАТОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ ПОД ВЛИЯНИЕМ КАНОНИЧЕСКОГО ЭЛЬ-НИНЬО И ЭЛЬ-НИНЬО МОДОКИ В ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ

Собаева Д.^{1,2}, Зюляева Ю.А.^{1,3}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

³Высшая школа экономики, Факультет географии и геоинформационных технологий, г. Москва

Ключевые слова: стратосферно-тропосферное взаимодействие, стратосферный полярный вихрь, ЭНЮК, численное моделирование.

Заблаговременность детерминистического прогноза интенсивности стратосферного полярного вихря (СПВ) в настоящее время составляет 2 недели. Однако низкочастотные компоненты климатической системы, такие как крупномасштабные аномалии температуры поверхности океана (аТПО), например, Эль-Ниньо – Южное колебание (ЭНЮК) и Тихоокеанское десятилетнее колебание, позволяют расширить период детерминистического прогноза динамики стратосферы.

С конца 1970-х годов все чаще наблюдается неканоническая фаза Эль-Ниньо (Эль-Ниньо Модоки). Целью данной работы является анализ особенностей взаимодействия стратосферы и тропосферы во время канонического Эль-Ниньо (КЭН) и Эль-Ниньо Модоки (ЭНМ) по данным идеализированных модельных экспериментов на платформе Isca. В этих экспериментах аТПО, соответствующие модам ЭНЮК, были увеличены по сравнению с наблюдаемыми значениями.

Показано, что аТПО в регионе Нино-3 (КЭН) приводят к ослаблению СПВ на 36% в ноябре–мае по сравнению с контрольным экспериментом. Ослабление вихря на фоне положительных аТПО в центральной части тропического Тихого океана (ЭНМ) по амплитуде сравнимо с экспериментом КЭН, основные различия наблюдаются поздней осенью и ранней весной. Данное различие вызвано более интенсивным распространением волн Россби в эксперименте Эль-Ниньо Модоки. Различия также обнаружены в пространственной структуре планетарной волны 2 в экспериментах КЭН и ЭНМ. Отрицательные аТПО, соответствующие Ла-Нинья (ЛН), приводят к ослаблению СПВ лишь на 20% по сравнению с контрольными значениями.

Анализ крупномасштабной структуры поля давления в средней тропосфере показывает, что как каноническое Эль-Ниньо, так и Эль-Ниньо Модоки приводят к усилению Тихоокеанского-северо-американского колебания. Во время Ла-Нинья пространственная структура аномалий давления соответствует усилению Арктической осцилляции.

В эксперименте ЭНМ наблюдается наибольшая частота внезапных стратосферных потеплений. В эксперименте ЛН наблюдается более низкая частота, однако она в два раза выше, чем в контрольном эксперименте.

Работа выполнена в рамках Госзадания (№ FMWE-2022-0002).

ВКЛАД ОТДЕЛЬНЫХ РЕГИОНОВ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕНА В БАЛАНС АДВЕКТИВНОГО ТЕПЛА И СОЛИ

Соколов А.А.¹, Иванов В.В.², Смирнов А.В.¹

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

²Московский государственный университет, г. Москва

Ключевые слова: Северо-Европейский бассейн, Северный Ледовитый океан, адвективный теплоперенос.

Северо-Европейский бассейн (СЕБ) входит в Северный Ледовитый океан (СЛО) и примыкает к Арктическому бассейну СЛО [1]. СЕБ занимает особое место в глобальной климатической системе. Являясь пограничной зоной между Атлантическим океаном и Арктическим бассейном, он во многом определяет климат умеренных и высоких широт [2]. Особенности гидрологического режима СЕБ определяются взаимодействием теплых и высокосоленых Северо-Атлантических вод с относительно распресненными и более холодными водами Арктики [3].

Принято считать, что адвекция Атлантической воды, несущих большие запасы тепла, солей и влаги из Атлантического океана в СЛО, является одним из важнейших факторов, определяющих современный климат Арктики [4].

В настоящей работе была выполнена оценка и анализ среднемноголетних гидрофизических характеристик теплопереноса через отдельные проливы, связывающие Арктический бассейн (АБ) СЛО с сопредельными водными бассейнами, и суммарных бюджетов тепла и соли АБ на основе данных океанского реанализа Global Ocean Ensemble Physics Reanalysis GLORYS2V4 (GLOBAL_REANALYSIS_PHP_001_031) за 1993 – 2020 гг.

Данные массива GLORYS12V4 представлены на регулярной сетке с шагом $1/4^\circ$ на 75 стандартных уровнях в глобальном масштабе. Потоки характеристик рассчитывались по методике, описанной в работах [5, 6]. Поток тепла рассматривался относительно температуры близкой к температуре замерзания морской воды ($-1,8^\circ\text{C}$). Расчет теплопереносов производился путём интегрирования по всей площади разрезов от поверхности до дна.

Основной сток из АБ в СЕБ проходит через пролив Фрама и составляет 2,37 Св. Среднемноголетний приток воды в СЕБ, из Северной Атлантики, составил 10,7 Св. Средний многолетний поток воды в СЕБ через северные, южные и восточные жидкие границы равен 19,32 Св. Сток воды из СЕБ через эти же границы составил 19,70 Св. По оценкам тренда установлено, что за 28 лет общий поток воды в южной части СЕБ, уменьшился на 5% (от среднего значения). Наиболее существенное усиление потока выявлено для Датского пролива – 24 %. Поток воды в проливе Фрама усилился на 0,6 Св. В целом, усиление потока воды отмечается для всех рассмотренных границ СЕБ.

Общее количество среднемноголетнего потока тепла, поступающего в СЕБ из Северной Атлантики и АБ составило 235,70 ТВт. Среднемноголетнее поступление тепла в южной части СЕБ составило 220,55 ТВт. Основное поступление среднемноголетнего тепла из АБ в СЕБ осуществляется через пролив Фрама и составил 60,31 ТВт. Поток тепла, проходящий через жидкую границу Баренцева моря (БМ), составил 94,03 ТВт. По оценкам тренда оказалось, что за 28 лет общий поток тепла в СЕБ, возрос на 11,52 ТВт. Суммарное количество среднемноголетнего потока соли, поступающего в СЕБ из Северной Атлантики и АБ составило 702,95 Мт/с. Общий поток соли, проходящий через жидкую границу БМ, составил 111,53 Мт/с. Основное поступление соли из АБ в СЕБ осуществляется через пролив Фрама (85,15 Мт/с). Среднемноголетний сток соли из СЕБ в АБ - 310,17 Мт/с. Суммарное количество среднемноголетнего потока соли, поступающего в СЕБ из Северной Атлантики и АБ, за 28 лет уменьшился на 82,81 Мт/с.

Наиболее интенсивное распространения потока тепла на север прослеживается в западной части АБ. Среднемноголетний поток тепла в западной части АБ составил 87,39 ТВт. Основной заток тепла проходит через восточную часть пролив Фрама и определяется Западно- Шпицбергенским течением (ЗШТ). По оценкам тренда оказалось, что за исследуемый период общий поток тепла в западной части АБ увеличился на 60%. В восточной части АБ основное поступление теплома-сопереносов осуществляется через Берингов пролив, а основной сток через проливы Канадского Арктического архипелага. Среднемноголетний общий потока тепла, поступающий через восточную часть АБ в СЛО, составил 1,64 ТВт. За 28 лет он увеличился на 93%.

Наиболее значительное поступление воды в БМ происходит из СЕБ жидкую границу БМ (3,07 Св). Основной сток из БМ проходит через жидкую границу Земли Франца-Иосифа (ЗФИ) и м. Желания (2,26 Св). Среднемноголетний приток через северные и восточные проливы и жидкие границы, соединяющие БМ с СЕБ и АБ, составляет 5,64 Св. В целом, за исследуемый интервал времени (1993-2020) средний многолетний поток воды в БМ через жидкие границы АБ и СЕБ составляет 0,68 Св. Сток воды из БМ в СЕБ и АБ оставил 4,95 Св. Основное поступление тепла отмечается через жидкую границу БМ (60,37 ТВт), поток тепла через границу между ЗФИ и м. Желания составил, 9,9 ТВт. Среднемноголетний перенос соли из СЕБ и АБ в БМ составляет 25,34 Мт/с. Наибольший поступление соли осуществляется, через жидкую границу БМ (111,53 Мт/с).

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00221, <https://rscf.ru/project/24-27-00221/>».

Список литературы

- 1) Тимофеев В.Т. Водные массы Арктического бассейна – Гидрометеорологическое изд-во, 1960.
- 2) Bengtsson L., Semenov V.A., Johannessen O.M. The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism // *Journal of Climate*. 2004. V. 17, № 20. P. 4045–4057.
- 3) Никифоров Е.Г., Шпайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. – Гидрометеоздат, 1980.
- 4) Bobylev L.P., Kondrat'ev K.I., Johannessen O.M. Arctic environment variability in the context of global change. – Springer, 2003.
- 5) Pnyushkov A.V. et al. Heat, salt, and volume transports in the eastern Eurasian Basin of the Arctic Ocean from 2 years of mooring observations // *Ocean Science*. 2018. V. 14, № 6. P. 1349–1371.
- 6) Сумкина А.А. и др. Сезонное очищение ото льда Баренцева моря и его зависимость от адвекции тепла Атлантическими водами // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 1. С. 82–97.

ТРИТИЙ В ВОДАХ ЯПОНСКОГО, ОХОТСКОГО МОРЕЙ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА В 2022-23 ГОДАХ

Соколов Д.Д., Калужный Д.С., Горячев В.А.

Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва ДВО РАН

Ключевые слова: тритий, Японское море, Охотское море, Тихий океан.

В исследованиях взаимодействия океана и атмосферы, а также в распространении водных и воздушных масс, значительная роль придается трассерным методам. Тритий, благодаря своей радиоактивности (β -распад) и периоду полураспада в 12.43 года, находит широкое применение как трассер при глобальных и региональных исследованиях циркуляции, перемешивания и происхождения водных масс. Важность исследований трития подчеркивается его эффективным использованием в радиоэкологическом контроле за ядерными объектами и мониторинге распространения радиоактивных загрязнений в окружающей среде, особенно в океане [1]. Особое значение трития среди других трассеров состоит в том, что только он имеет длинные временные ряды и хорошую пространственную изученность в океане, поскольку измерялся начиная с 1950-х годов.

В рейсах на НИС “Академик Опарин” №65 и №68 проходивших, соответственно, с 26.11.22 по 29.12.22 г. и с 5.08.23 по 15.09.23 г., Японском, Охотском морях и в северо-западной части Тихого океана были отобраны пробы воды для анализа на содержание трития. Измерения выполнены в лаборатории ядерной океанологии Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичёва на ультранизкофоновом жидкосцинтилляционном $\alpha\beta$ -спектрометре QUANTULUS 1220 фирмы PerkinElmer, после предварительного электролитического обогащения.

Результаты показали средние концентрации трития составляют 1.1 ТЕ (0.132 Бк/л), 1 ТЕ (0.12 Бк/л), 0.8 ТЕ (0.096 Бк/л) в поверхностной воде Японского, Охотского морей и Тихого океана соответственно. Максимальные концентрации зарегистрированы в пробах, отобранных вблизи берегов Приморья 1.4–1.6 ТЕ, у восточного побережья о. Сахалин и в южной части Охотского моря 1.7–1.9 ТЕ. У восточного побережья полуострова Камчатка 0.9–1.3 ТЕ. Минимальные концентрации зарегистрированы в Японском море, в центральной части 0.8 ТЕ, в центре Охотского моря и в восточной части вблизи Курильских островов 0.5–0.7 ТЕ. В Тихом океане 0.3–0.4 ТЕ, к востоку от полуострова Камчатка и Курильских островов. Согласно результатам работ [2, 3] в Тихом океане с 1990 г. к 2016 г. концентрации трития снизились от 1.7 до 0.6 ТЕ (от 0.204 до 0.072 Бк/л), что согласуется с нашими данными для района Тихого океана, к востоку от Курильских островов. Полученные результаты имеют важное практическое значение, как фоновые характеристики района для изучения влияния сбросов загрязненной тритием воды с аварийной АЭС Фукусима-1, начавшихся в августе 2023 г. и запланированные на последующие 30 лет.

Исследования выполнялись по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг., подпрограмма 2 “Фундаментальные и поисковые научные исследования”, направление 1.5.8. Океанология, раздел 1.5.8.7. Комплексные и междисциплинарные исследования океанов и морей, темы №6 и №11 (рег. № 121021700346-7, № 121-21500052-9), а также в рамках Комплексной межведомственной программы “Экологическая безопасность Камчатки: изучение и мониторинг опасных природных явлений и антропогенных воздействий” (рег. № 122012700198-9).

Список литературы

- 1) Салюк А.Н. Исследование предельных возможностей тритиевого трассера в океанологии и разработка систем компьютерного управления тритиевого измерительного комплекса // Автореферат дис.канд. физ.-мат. наук. - Владивосток, 1994. 23 с.

- 2) Watanabe Y.W., Watanabe S., Tsunogai S. Tritium in the northwestern North Pacific // Journal of Oceanography. 1991. V. 47. P. 80–93.
- 3) Oms P.-E., Du Bois P.B., Dumas F., Lazure P., Morillon M., Voiseux C., Le Corre C., Morin P. Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016 // Science of the Total Environment. 2019. V. 656. P. 1289–1303.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛАГРАНЖЕВЫЙ АНАЛИЗ ПРИБРЕЖНОГО АПВЕЛЛИНГА В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Файман П.А., Будянский М.В., Солонец И.С., Дидов А.А., Сапогов И.М., Пранц С.В.

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН,
г. Владивосток*

Ключевые слова: Прибрежный апвеллинг, Японское море, ROMS, индексы апвеллинга, экспоненты Ляпунова, отслеживание частиц.

Сезонный прибрежный апвеллинг в северо-западной части Японского моря (ВЯМ) изучается с помощью пяти индексов апвеллинга [1], трехмерного лагранжевого слежения за частицами [2], накопленного показателя Ляпунова и спутниковых данных о температуре поверхности моря (SST) и концентрации хлорофилла-а. Прибрежный апвеллинг в районе исследования, начинается в конце сентября, когда преобладают северо-западные, западные и юго-западные ветры. Результаты моделирования получены с использованием выходных данных численной модели циркуляции ROMS с высоким горизонтальным разрешением 600 м. Интенсивность апвеллинга оценивалась путем расчета разности SST между прибрежной и шельфовой зонами, индексов переноса и накачки Экмана, высоты поверхности моря и скорости шельфовых поверхностных течений. Сильный апвеллинг осенью 2017 г. был выявлен на основе расчета термических и других индексов за длительный период времени с 2000 по 2019 г. по результатам моделирования и спутниковых наблюдений. Перемежаемость активной и прерывной фаз процесса апвеллинга осенью 2017 г. коррелирует с изменением направления ветра и завихрения поверхностного ветрового напряжения в районе исследования. Прямое наблюдение апвеллинга холодных придонных вод к поверхности было проиллюстрировано с помощью 3D лагранжева трекинга частиц, адвектированных модельным полем скорости. Детальное исследование позволило сделать вывод о том, что это еще более сложный динамический процесс с заметными пиками в распределении апвеллинговых частиц, длящимися не более двух часов. Другой важный результат исследования - выделение транспортных барьеров, разделяющих поверхностные воды с разной температурой. Расположение этих барьеров аппроксимируется линиями с максимальными значениями конечно-временной экспоненты Ляпунова, что дает информацию о термических фронтах апвеллинга и закономерностях переноса, связанных с течением. Результаты моделирования согласуются со спутниковыми данными по SST и хлорофиллу-а осенью 2017 года, а также со спутниковыми и натурными наблюдениями за прибрежным апвеллингом в районе исследования в другие годы.

При поддержке Росийского Научного Фонда, проект номер 23-17-00068, код ГРНТИ 37.25.00

Список литературы

- 1) Bakun A. Coastal upwelling indices, west coast of North America, 1946–71 // NOAA technical report NMFS SSRF, 671. 1973
- 2) Schlag Z.R., North E.W. Lagrangian TRANSport model (LTRANS v.2) User's Guide // Technical Report of the University of Maryland Center for Environmental Science Horn Point Laboratory. Cambridge, MD. 2012. P. 183

ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ

Сумкина А.А., Кивва К.К.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: взаимодействие океана и атмосферы, Арктика, дата начала нагрева поверхности моря, дата окончания нагрева поверхности моря.

В Баренцевом море (БМ) наблюдается интенсивное сокращение площади морского льда. В настоящее время БМ является важным регионом для изучения взаимодействия между атмосферой, морским льдом и океаном [1]. Ранее нами показано, что на севере, северо-востоке и востоке Баренцева моря (БМ) наблюдается статистически значимый отрицательный линейный тренд суммарного теплового баланса поверхности моря за зимний период тренд порядка -1000 (МДж/м²×сут)/40 лет [2]. То есть, в этих районах в последние годы поверхность моря теряет гораздо больше тепла за зиму, чем в более ранние годы. В данном исследовании рассматривается межгодовая изменчивость дат наступления теплого и холодного периодов года, продолжительность теплого и холодного периодов.

Использованы данные коротковолновой и длинноволновой радиации, потоков явного и скрытого тепла атмосферного по результатам реанализа ERA5 (Европейский анализ, версия 5). Этот реанализ выполняется с использованием термодинамической модели атмосферы Европейского центра среднесрочного прогнозирования погоды. Составляющие теплового баланса рассчитываются по аэродинамическим балк-формулам (упрощенные объемные формулы) [4]. Продукт имеет горизонтальное разрешение $0,25 \times 0,25$ по широте и долготе и шаг по времени 1 час. Использованы данные с 1979 по 2019 гг. ТБ поверхности моря рассчитан, как сумма потоков коротковолновой и длинноволновой радиации, явного и скрытого тепла. Для анализа использованы осредненные посуточно данные. Тепловой баланс сглажен 30-дневным скользящим средним. Даты перехода ТБ через ноль для каждого сезона определены следующим образом: выбраны те даты, после которых продолжительность периода с тепловым балансом выше и ниже 0 была наибольшей.

Распределение среднегодовых дат начала нагрева и начала охлаждения поверхности моря имеет зональное распределение в южной части Баренцева моря (к югу от 72° с.ш.), а в центральной и северной частях моря осложняется секторностью за счёт действия течений. Выявлен сдвиг даты начала нагрева в южной и юго-восточной части на более поздние сроки (4–5 дней за 10 лет), и наоборот, сдвиг на более ранние сроки в северной и северо-восточной части моря (4–5 дней за 10 лет). Для дат окончания нагрева наблюдается обратная ситуация, чем для дат начала нагрева.

Список литературы

- 1) Smedsrud L.H. et al. The role of the Barents Sea in the Arctic climate system // *Reviews of Geophysics*. 2013. V. 51, № 3. P. 415–449. <https://doi.org/10.1002/rog.20017>
- 2) Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В. Анализ изменений параметров зимнего теплового баланса Баренцева моря // *Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы X международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов, Москва, 10–11 ноября 2022 года. Федеральное агентство по рыболовству, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии». Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии. 2022. С. 397–399.*

ДОЛГОПЕРИОДНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗОВ

Сухонос П.А.¹, Иванов В.В.², Дианский Н.А.^{2,3,4}

¹Институт природно-технических систем, г. Севастополь

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

³Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука, г. Москва

⁴Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва

Ключевые слова: температура, реанализ океана, квантильная регрессия, Северная Атлантика

Возможности достоверной реконструкции долгопериодных изменений температуры океана резко ограничены существенной неоднородностью данных наблюдений, особенно в глубинных слоях. В связи с этим получение реалистичной картины эволюции температуры Мирового океана и его отдельных регионов за длительный период крайне необходимо для понимания причин современных изменений климата [1].

Опубликованные оценки климатических трендов температуры Северной Атлантики, полученные по данным различной длительности из разных источников и в большинстве своём приуроченные к поверхности океана, имеют рассогласования и их сложно интерпретировать. Это приводит к неопределенности в структуре и величине долгопериодного изменения температуры океана. Цель данной работы – получить уточнённую количественную оценку изменения температуры вод Северной Атлантики на основании нескольких массивов данных за многолетний период.

Используются среднемесячные данные о температуре океана из массивов объективного анализа океана EN.4.2.2 и ISHII и массивов реанализа океана, включая: GECCO3 (версия 3S6m), ORAS4, GFDL, ORA-S3, ORAS5, GODAS, SODA (версия 3.12.2). Исследуемый регион ограничен координатами 0° – 70° с. ш. 8° – 80° з. д.

В качестве количественного показателя долгопериодного изменения температуры океана использованы оценки линейных трендов медианных значений этой характеристики. Квантильная регрессия представляет собой процедуру оценки параметров регрессии (чаще всего линейной) для любого из квантилей интервала от 0 до 1 значений зависимой переменной. Для медианных значений квантиль равен 0.5. Преимущества квантильного регрессионного анализа по сравнению с другими методами обсуждаются в [2].

Расчёты проводились для каждого массива данных в каждом узле сетки на всех доступных горизонтах от поверхности до дна за временные интервалы: 1961–2011 гг. и 1980–2011 гг. Первый интервал – общий период для наибольшего числа массивов данных. Второй интервал выбран потому, что именно с ~ 1980 г. наблюдался быстрый рост глобальной ТПО, обусловленный совпадением антропогенного тренда и естественной мультидесятилетней изменчивости. Затем коэффициенты квантильных трендов температуры океана усреднялись зонально.

Среднезональные тренды температуры Северной Атлантики за период 1961–2011 гг. в верхнем 400 м слое в области от экватора до 70° с. ш., в основном, положительны. Коэффициенты квантильного тренда превышают $0.1^{\circ}\text{C}/10$ лет. Выделяются две области наибольшего потепления. Одна область расположена в Тропической Атлантике (0° – 10° с. ш.) на глубине около 100 м с величинами коэффициентов квантильного тренда более $0.25^{\circ}\text{C}/10$ лет. Эта область слабо выражена по ISHII и GFDL. Другая область расположена в окрестности 40° с. ш. в слое 10–200 м с величинами коэффициентов квантильного тренда более $0.2^{\circ}\text{C}/10$ лет. По GECCO3, ORAS4 и ORA-S3 среднезональные квантильные тренды температуры океана отрицательны в нескольких областях (с коэффициентами менее $-0.1^{\circ}\text{C}/10$ лет). Однако поскольку эти области регистрируют-

ся только для трёх массивов данных и расположены в разных местах, то общую закономерность похолодания океана выделить не удастся.

Среднезональные тренды температуры Северной Атлантики в период 1980–2011 гг. преимущественно положительны. Выделяется общая для всех массивов данных область потепления с коэффициентами квантильного тренда более $0.3 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ в верхнем 400 м слое в полосе широт $50^\circ\text{--}65^\circ \text{ с. ш.}$ Толщина слоя с коэффициентами квантильного тренда более $0.2 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$ увеличивается от экватора к 65° с. ш. Исключение составляют среднезональные тренды по GECCO3 и GODAS на 40° с. ш. , где получены около нулевые коэффициенты медианных трендов. По данным всех реанализов, кроме GFDL, обнаружены области с отрицательными значениями среднезональных трендов температуры океана (менее $-0.1 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ лет}$). В Тропической Атлантике ($0^\circ\text{--}25^\circ \text{ с. ш.}$) в рассматриваемый временной период в слое 100–150 м выделяется общая для большинства массивов данных область с похолоданием.

Таким образом, в период 1961–2011 гг. потепление Северной Атлантики, в основном, наблюдается в верхнем 400 м слое от экватора до 70° с. ш. За этот период рост медианы среднемесячной температуры океана в этом слое в среднем по акватории составил $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. В период 1980–2011 гг. интенсивное потепление Северной Атлантики, в основном, происходило в верхнем 400 м слое в высоких широтах ($50^\circ\text{--}65^\circ \text{ с. ш.}$). За этот период рост медианы среднемесячной температуры океана в субполярном круговороте составил $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 23-77-01054).

Список литературы

- 1) Добролюбов С.А. Океан и изменения климата // Партнерство цивилизаций. 2020. № 1–2. С. 174–178.
- 2) Тимофеев А.А., Стерин А.М. Применение метода квантильной регрессии для анализа изменений характеристик климата // Метеорология и гидрология. 2010. № 5. С. 27–41.

ОЦЕНКА ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И ОСНОВНЫХ ФОРМИРУЮЩИХ ЕГО ФАКТОРОВ

Тимофеева А.Б.¹, Май Р.И.^{1,2}, Миронов Е.У.¹, Егорова Е.С.¹, Рубченя А.В.^{2,3}

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова (СПО ФГБУ «ГОИН»), Санкт-Петербург,

Ключевые слова: возрастной состав льдов, возрастные градации льдов, море Лаптевых, межгодовые изменения, старые льды, однолетние льды, молодые льды, начальные льды.

В работе рассматривается возрастной состав ледяного покрова моря Лаптевых, являющийся одной из основных характеристик в осенне-зимний период. Произведена оценка сезонного хода с октября по май льдов различного возраста, а также их межгодовых изменений. В анализе использовались региональные карты ледовых условий моря Лаптевых, составленные в ААНИИ на основе спутниковой информации (доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [1]) за ряд наблюдений 1997–2023 гг. Региональные карты представляют собой результат анализа спутниковой информации за 2-3 суток [2] и разрабатываются с использованием системы ArcGIS, выделением однородных ледовых зон, преобразованных в полигональные объекты в виде векторного файла, структура атрибутивной таблицы приводится к стандарту ВМО SIGRID-3 [2], и регламентируется Номенклатурой [3, 4]. Технически в данных формата SIGRID-3 были получены полигоны зон со льдами того или иного возраста и их площади. Для оценки пространственно-временной изменчивости положения использовался метод расчета вероятности пересечений полигонов, предложенный в работе [5]. Метод основан на рекурсивном пересчёте полигонов вероятностей пересечений при последовательном добавлении в выборку новых исходных полигонов. Таким методом получена пространственно-временная изменчивость следующих возрастных градаций: начальные льды, нилас, серый и серо-белый лед, однолетний тонкий, средний, толстый, а также старые льды.

Анализ сезонного хода позволил выявить закономерности накопления и изменения льдов разной возрастной градации. Важной особенностью моря является значительное развитие припая зимой, достигающего 30% площади всего моря, при этом площадь припая в восточной мелководной части более чем в два раза превышает площадь припая западной части. Дрейфующие льды западной части моря в среднем составляют 83%, при этом на начало ледообразования часто присутствуют остаточные льды Таймырского ледяного массива, сохранившиеся после летнего периода таяния. Постепенно их количество уменьшается вследствие выноса льдов из моря, однако некоторое количество старых льдов сохраняется в течение всей зимы. Ледообразование в восточной части моря, как правило, происходит на чистой воде, однако в среднем до 35% льдов этой части моря формируют обширный припай (в мае, на момент максимального развития до 51-52%). До первой декады ноября в море преобладают молодые (серые и серо-белые) льды, на них приходится 60-68 %. Молодые и начальные льды присутствуют в море в течение всего периода нарастания ледяного покрова, постоянно образуясь в заприпайных полыньях, а также в трещинах, каналах и разводьях, образующихся вследствие дрейфа и постоянных подвижках льда. Переход в градацию однолетних тонких льдов начинается с середины октября, достигая 40-53% во второй декаде ноября. Максимальное количество однолетних тонких льдов приходится на первую декаду декабря и составляет 46 %. Однолетние средние становятся преобладающими со второй декады января и остаются ими до середины марта - конца апреля (в зависимости от части моря). С середины января в процессе нарастания толщины часть этих льдов постепенно переходит в градацию

однолетних толстых льдов, которые преобладают с третьей декады марта, их количество меняется в последующие месяцы незначительно.

При оценке межгодовых колебаний возрастного состава выявлена тенденция к смещению сроков перехода в следующую возрастную градацию на более поздние, а также тенденция к сокращению количества старых и однолетних толстых льдов, количество однолетних средних и молодых льдов при этом соразмерно увеличилось.

Также были рассмотрены основные факторы, определяющие межгодовые изменения площади льдов различных возрастных градаций для отдельных районов моря Лаптевых, для чего были построены физико-статистических уравнения с наибольшими коэффициентами корреляции и детерминации и найдены оптимальные комбинации предикторов для описания изменений возрастного состава ледяного покрова моря. Основными факторами, оказывающими влияние на возрастную структуру льдов моря Лаптевых являются характер атмосферной циркуляции, предыстория ледовитости, приземная температура воздуха. Оценка выполнялась с использованием климатических индексов Арктического колебания, Арктического диполя и Северо-Атлантического колебания. Для всех физико-статистических уравнений получены коэффициенты корреляции.

Исследование выполнено в рамках программы ЦНТП № 5.1.2. Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений.

Список литературы

- 1) <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> - Архив региональных ледовых карт ААНИИ // Мировой центр данных по морскому льду - (дата обращения: 06.11.2023)
- 2) Афанасьева Е.В, Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д, Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. №7. С. 5–20. DOI: 10.24411/2658-4255-2019-10071
- 3) JCOMM Technical Report No23, SIGRID-3: A vector archive format for sea ice georeferenced information and data. 2014.
- 4) WMO No259, WMO Sea-Ice Nomenclature. 2017.
- 5) Май Р.И., Ганиева К.Р., Топаж А.Г., Юлин А.В. Повторяемость появления припая, вычисленная на основе анализа полигонов электронных ледовых карт (на примере Карского моря). Криосфера Земли. Т. XXVI, № 5. 2022.

МОРСКИЕ ВОЛНЫ ТЕПЛА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Травкин В.С.^{1,2}, Тихонова Н.А.^{1,2}, Захарчук Е.А.^{1,3}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Государственный океанографический институт имени Н.Н.Зубова, Росгидромет, г. Москва

³Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск

Ключевые слова: физика океана, морские волны тепла, Балтийское море.

В последние десятилетия в Мировом океане наблюдается рост числа экстремальных событий, являющихся причиной экологических катастроф и социально-экономических потерь [1]. Морские волны тепла (МВТ) являются продолжительными дискретными периодами с аномально теплой водой на поверхности определенной морской акватории. За последнее десятилетие МВТ были обнаружены во многих районах Мирового океана, в т.ч. в окраинных морях и прибрежных акваториях, а их площадь и период способны достигать нескольких тыс. км и недель. Отмечается, что интенсивность МВТ наиболее существенна в средних широтах, и в некоторых районах может быть связана с крупномасштабными климатическими процессами, такими как Эль-Ниньо [1].

Образование МВТ связывают с атмосферными процессами (влиянием волн Россби, ветровым воздействием и интенсивным радиационным прогревом) и океаническими (конвекцией и адвекцией). МВТ имеют сильное воздействие на морские организмы и прибрежные экосистемы. Баланс между локальными аномалиями океанических и атмосферных параметров позволяет МВТ существовать в течение нескольких лет. Увеличение частоты, продолжительности и интенсивности МВТ может существенно повлиять на биоразнообразие, структуру и функционирование морских экосистем.

Балтийское море – внутриматериковое, существенно ограниченное море, целиком лежащее в пределах шельфа. Оно характеризуется сложным очертанием берегов, незначительными средними глубинами и слабым водообменом с Атлантическим океаном, поскольку соединяется с Северным морем лишь через неглубокие и узкие Датские проливы. Балтийское море омывает берега девяти экономически развитых стран, а на его водосборном бассейне проживает более 85 млн человек, что свидетельствует об исключительной важности климатических изменений в Балтийском регионе.

Целью нашей работы является выделение МВТ в Балтийском море за 1993-2022 гг. и оценка их основных характеристик: занимаемой площади, продолжительности существования, интенсивности, кумулятивной величины. Также мы подробно исследуем механизмы образования одной из наиболее продолжительных и интенсивных МВТ, зафиксированной с октября 2000 года по март 2001 года.

В работе используются данные по температуре воды, глубине верхнего квазиоднородного слоя, а также u и v компонентам скоростей течений за 1993-2022 гг. гидрофизического реанализа Балтийского моря BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011, доступного на портале Copernicus Marine Service (https://data.marine.copernicus.eu/product/BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011/). Основой реанализа является модель NEMO-Nordic, базирующаяся на модели NEMO-3.6. Пространственное разрешение по широте и долготе составляет 2' и 3'20", соответственно. По вертикали массив содержит 57 горизонтов от поверхности до глубины 711 м (в проливе Скагеррак). Вертикальная скорость течений w рассчитывалась на основе уравнения неразрывности [2].

В работе также используются данные за 1993-2022 гг. глобального климатического реанализа ECMWF ERA5. Реанализ ERA5 ассимилирует как модельные данные, так и натурные измерения. Пространственное разрешение ERA5 составляет 0.25° по широте и долготе для атмосферы и 0.5° по широте и долготе для параметров морских волн. Массив содержит данные за период с 1940 г. по настоящее время с временным разрешением в 1 час. В работе мы используем данные по потокам

коротко- и длинноволновой радиации, а также потокам скрытого и явного тепла на поверхности океана.

Мы также используем данные по скорости и направлению ветра за период 1993-2022 гг., полученные с 6 прибрежных станций шведской метеорологической сети. Данные доступны на портале (<https://www.smhi.se/>).

Полученные результаты свидетельствуют о наибольшем влиянии МВТ на акватории Финского, Рижского и Гданьского заливов, а также на центральную часть Балтийского моря. Наименьшее влияние МВТ оказывают на северную часть Ботнического залива, а также на юго-западную часть Балтийского моря. Наибольшая интенсивность МВТ была зафиксирована в летний период, тогда как в весенний период влияние МВТ минимально. В осенне-зимний период продолжительность МВТ выше, по сравнению с осенне-летним периодом. Установлено, что даже в соседние годы число МВТ, а также их интенсивность и продолжительность может варьироваться в несколько десятков раз.

СПО ФГБУ "ГОИН", тема 4.6.7 плана НИТР Росгидромета.

Список литературы

- 1) Wang D., Xu T., Fang G., Jiang S., Wang G., Wei Z., Wang Y. Characteristics of Marine Heatwaves in the Japan/East Sea // Remote Sens, – 2022. – 14(4). – P. 936. <https://doi.org/10.3390/rs14040936>
- 2) Дианский Н.А., Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на коротко-периодные и долгопериодные атмосферные воздействия // Физматлит, 2013. 272 с.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ И ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ВАРИАЦИЙ ДОННОГО ДАВЛЕНИЯ В ОХОТСКОМ МОРЕ

Трегубов А.С.^{1,2}, Диденкулова Е.Г.^{1,2}, Кокорина А.В.¹, Слюняев А.В.^{1,2}

¹Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, Нижний Новгород

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород

Ключевые слова: ветровые волны, распределение вероятностей высот волн, аномально высокие волны, нелинейные волны, статистика волновых записей, Охотское море, натурные измерения.

В данной работе обрабатываются и анализируются данные долговременных измерений вариаций донного давления, по которым восстанавливаются характеристики морского волнения. Данные получены с помощью датчиков гидростатического давления у берегов острова Сахалин в Охотском море [1-2]. Использовались датчики, регистрирующие давление с частотой 1 Гц и 8 Гц. Для обработки были выбраны записи, имеющие общую продолжительность чуть более одного года, а сама обработка состояла из нескольких этапов. Первый этап - применение формулы гидростатического пересчета для восстановления величины смещения водной поверхности по давлению, индуцированному на дне водоема. Далее - удаление части данных вручную (например, сбои оборудования или данные, полученные во время устойчивого ледяного покрова). Затем производилось прямое и обратное преобразования Фурье для удаления низкочастотных компонент для исходных (несколько месяцев) фрагментов данных целиком, то есть для удаления гармоник, соответствующих приливам, отливам, прохождению атмосферных фронтов и т.д. Такие компоненты приводят к сильному колебанию среднего уровня, что делает невозможным корректное выделение индивидуальных волн в записи. Следующий шаг - разбиение записи на 20-минутные отрезки для решения проблемы сильной статистической неоднородности данных (в записях встречаются разные режимы волнения, от умеренных, высота волн в которых не больше половины метра, до штормовых, в которых она достигает 5-7 метров), в результате волнение в полученных фрагментах рассматривается как стационарный процесс. Также для записей, полученных с датчиков с частотой дискретизации 1 Гц, для более точного определения высот волн использовался алгоритм сплайн-интерполяции, основанный на искусственном дополнении фурье-спектра.

Анализ обработанных данных также состоял из нескольких этапов. Первый этап - оконное преобразование Фурье с маской Хана, варьируя ширину и шаг окна представляется возможным отследить эволюцию спектра и сравнить её с режимами волнения. На этом этапе собирается информация о спектральных характеристиках каждого 20-минутного фрагмента (например, безразмерная относительная ширина спектра) и появляется возможность разделить записи с однопиковым спектром от записей с двухпиковым. Второй этап - выделение индивидуальных волн, оценка их высот и периодов. В данной работе ставится цель получить некоторые выводы о физических механизмах волнения на воде в рамках конечной глубины в целом, а не характеристики волнения в конкретной акватории. В частности, ставится задача определить какие условия и в какой мере влияют на вероятность возникновения больших волн. Исходя из этих соображений, рассмотрены безразмерные величины: безразмерная глубина, крутизна и параметр нелинейности. Следующим шагом является сортировка полученных записей по безразмерным параметрам индивидуальных волн и безразмерным спектральным параметрам. Построены тепловые карты и функции распределения высот волн по выборкам в диапазоне этих параметров. Функции распределения нормированы на значительную высоту [3-4], которая является средним от трети наибольших волн в записи.

В результате построения указанных функций распределения можно сделать вывод о поведении "хвостов" функций (в них наглядно отображаются самые высокие волны), а также сравнить их с эталонными распределениями (в данном случае это распределения Рэлея и Глуховского). Из этих

построений сделан вывод о том, что разным значениям безразмерных параметров соответствует разная вероятность. Более конкретно, при большой нелинейности снижается число волн, в два или более раза превосходящее значительную высоту волнения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 22-17-00153)

Список литературы

- 1) Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Пелиновский Е.Н. Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4, № 4. С. 35–42.
- 2) Кокорина А.В., Слюняев А.В., Зайцев А.И., Диденкулова Е.Г., Москвитин А.А., Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Анализ данных долговременных измерений волн у острова Сахалин // *Экологические системы и приборы*. 2022. № 12. С. 45–54.
- 3) Massel S.R. *Ocean surface waves: Their physics and prediction*. World Scientific Publ., Singapore. 1996. 491 p.
- 4) Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. *Волны-убийцы: факты, теория и моделирование: монография изд. 2-е.* – М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 178 с.

ЭВОЛЮЦИЯ И СТРУКТУРА МЕЗОМАСШТАБНОГО АНТИЦИКЛОНИЧЕСКОГО ВИХРЯ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ: НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ И ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ

Удалов А.А., Будянский М.В., Пранц С.В., Лобанов В.Б., Ладыченко С.Ю.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: вихрь Японского моря, автоматическое детектирование, состав воды, лагранжесв анализ.

На широте 39–41° сш в Японском море (ЯМ) происходит слияние субтропических и субарктических вод, что приводит к формированию субполярного фронта, который простирается через весь бассейн от берегов Кореи до Японских островов. Меандрирование фронтального потока сопровождается формированием вихрей различной полярности и размеров, образующихся в результате бароклинной неустойчивости [1]. Квазистационарные фронтальные вихри в северной части ЯМ были отобраны и изучены гораздо реже, чем квазистационарные вихри в южной части моря, такие как теплый квазистационарный антициклон (АЦ) Уллынг в бассейне Уллынг, АЦ над рельефом дна в районе отрога Оки, антициклон Вонсан и циклонический (Ц) вихрь Док между антициклонами Уллынг и Оки [2]. Все эти вихри были хорошо изучены с помощью судовых и спутниковых наблюдений, поверхностных дрейфтеров и буев-профилографов.

В данной же работе была проанализирована область к северу от субполярного фронта на северо-западе ЯМ, где регулярно формируются, циркулируют и затухают мезомасштабные вихри. Фронтальные вихри в северо-западной части ЯМ интересны еще и тем, что они формируются в области смешения теплых субтропических и холодных субарктических вод, что оказывает влияние на морскую экосистему. Это может быть важно для понимания путей переноса субтропических видов рыб. Начиная с последних десятилетий XX века, в северо-западной части ЯМ, вблизи побережья России, все чаще наблюдаются проникновения тепловодных рыб (угря, тунца, рыбы-луны и триггерфиша) и некоторых тропических и субтропических морских организмов (черепах, акул и др.) [3].

Основное внимание в работе уделяется антициклоническому вихрю в северо-западной части ЯМ, который был отобран в мае 2004 г. Этот мезомасштабный вихрь существовал на протяжении долгого времени, что позволило проследить его эволюцию от образования до распада с помощью лагранжеских индикаторов, основанных на альтиметрии. Цель работы – зафиксировать основные события в эволюции этого вихря на основе лагранжеских карт, определить происхождение водных масс, которые захватывались, удерживались и высвобождались вихрем, и сравнить результаты моделирования с данными судовых наблюдений и спутниковыми инфракрасными изображениями. Для этих целей лагранжеский подход представляется более подходящим, чем обычно используемый эйлеров, поскольку лагранжеские карты являются отпечатками истории вовлечения вод в вихревое движение.

На основе судовых наблюдений продемонстрирована многослойная структура этого вихря. Вихрь имел ядро теплой воды с низкой соленостью между 250 и 400 м, что характерно для вихрей, наблюдавшихся ранее в северо-западной части ЯМ [4]. Однако в его структуре обнаружены другие аномалии, которые ранее не наблюдались, включая ядро теплой и относительно высокосоленой воды между 30 и 230 м, которая теплее и солнее по сравнению с окружающей средой, и поверхностную воду выше сезонного пикноклина. Эти аномалии в вертикальном составе различных водных масс в вихре могут быть объяснены особенностями его эволюции.

Используя лагранжеский подход, была прослежена эволюция вихря за 9 месяцев с января по октябрь 2004 года. На основе ежедневно рассчитываемых L-карт и карт происхождения и "возраста"

вод обнаружено несколько событий увлечения вихрем окружающих вод, разделения и слияния с соседними вихрями. Проведенный анализ показал, что на протяжении всего периода эволюции вихря преобладал занос в него субтропических вод с юга. Особенно сильным он был в начале и в конце жизненного цикла вихря, в январе и октябре. Сразу после формирования и отрыва вихря от потока субтропических вод усилился захват прибрежных вод, окружающих вихрь. Наблюдался также занос в вихрь субарктических вод с севера, однако их объем был примерно в десять раз меньше, чем субтропических вод. Большой занос окружающих вод в вихрь в феврале привел к его быстрому увеличению и разделению на два вихря позднее. Эти события были подтверждены спутниковыми инфракрасными изображениями.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №23-17-00068.

Список литературы

- 1) Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // *Deep Sea Research Part II*, 2005. – V. 52. – P. 1547–1563.
- 2) Lee D.-K., Niiler P. Eddies in the southwestern East/Japan Sea // *Deep Sea Res. Part I*, 2010. – V. 57. – P. 1233–1242.
- 3) Ivankova V.N., Samuilov A.E. New fish species for the USSR waters and an invasion of heat-loving fauna in the north-western part of the Japan Sea // *Voprosy Ihtiologii*, 1979. – V. 19. – P. 449–550.
- 4) Lobanov V.B., Ponomarev V.I., Salyuk A.N., Tishchenko P.Y., Talley L.D. Structure and dynamics of synoptic scale eddies in the northern Japan Sea. In: *Far Eastern Seas of Russia*, Ed. V.A. Akulichev. V. 1. Oceanographic Research. Nauka: Moscow, 2007. – P. 450–473.

ОЦЕНКА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ В ЧУКОТСКОМ МОРЕ

Филипсон В.А.¹, Гордеева С.М.^{1,2},

¹Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: климатические изменения Северный Ледовитый океан, Чукотское море, Берингов пролив, расход воды, поток тепла, поток соли.

Северный-Ледовитый океан интенсивно взаимодействует с водами Тихого океана, что вносит существенный вклад в формирование его гидрологического режима. Тихоокеанские воды приносят через Берингов тепло в Северный Ледовитый океан, что вносит существенный вклад в изменчивость морского льда в Чукотском море [1].

Цель исследования заключалась в оценке потоков воды, тепла и соли через центральную часть Чукотского моря в среднем многолетнем усреднении.

В качестве исходных данных был использован реанализ CMEMS GLORYS12V1 морской службы Copernicus (https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030/). Рассматривался широтный разрез по параллели 68°33' с.ш., на долготах от 177°58' до 166°58' в.д. – от восточного побережья России на западе до побережья Аляски на востоке. Выбирались среднемесячные значения меридиональной компоненты скорости течения, температуры и солёности воды каждые 0,83° долготы на 19 горизонтах от 0 до 55,76 м за период с января 1993 по декабрь 2020 года.

Для каждой ячейки разреза отдельно рассчитывались объёмный расход, потоки тепла и соли по формулам [2], которые затем суммировались на всём разрезе и на отдельных вертикалях. Поток тепла рассчитывался относительно температуры замерзания воды (-1,8 °С). Солёность – относительно 0,0 г/кг.

Установлено, что основной поток воды через Чукотское море идет из Тихого океана в Северный Ледовитый океан. Максимальные скорости течения 25-30 см/с отмечаются в поверхностном слое (до 20 м) в восточной части разреза. Температура имеет ясно выраженное теплое ядро в восточной части разреза, также теплый слой воды распространяется по поверхности к западу в слое до 20 метров. В среднем, в поверхностном и подповерхностном слоях значения температуры воды достигают 1,67 °С. В придонном слое вода наиболее холодная - -0,6 °С. Солёность имеет ярко выраженную область высоких значений в середине разреза и достигает максимума в придонном слое (32,77 ‰). Наименьших значений солёность достигает в западной части разреза (28,32 ‰).

Можно сделать вывод, что распределение гидрофизических характеристик на разрезе поперек Чукотского моря показывает наличие двух основных потоков: южного, который занимает подавляющую часть разреза с максимальными скоростями и температурой воды, и северного, узкой струёй распространяющегося вдоль восточного склона материка – с небольшими скоростями и относительно холодной и распресненной водой. Распределение солёности в южном потоке не повторяет распределения скоростей и температуры воды, и обладает максимальными значениями у дна в центральной части, которые убывают в сторону берегов.

Средние многолетние (1993-2020 гг.) значения расхода воды, потоков тепла и соли через широтный разрез по 68°33' с.ш. составляют 1,318 Св, 15,775 ТВт, 44,464 кт/с, соответственно. При сравнении с потоками через Берингов пролив на разрезе по 65°75' с.ш, которые в среднем многолетнем усреднении составили для расхода воды 1.418 Св, потоков тепла и соли 16.95 ТВт и 47.07 кт/с [3] видно, что между этими двумя разрезами, в южной части Чукотского моря, отмечается накопление воды, тепла и соли, что может формировать повышенный уровень моря, очаг тепла

для взаимодействия с атмосферой и дополнительное осолонение воды, что требует дополнительного исследования.

Для гидрологических характеристик в каждой ячейке разреза оценивался линейный тренд. Оценка значимости коэффициента линейного тренда проводилась по t-критерию Стьюдента с уровнем значимости 0.05. В восточной части разреза отмечается положительный тренд в скорости течения, в западной – отрицательный. Следовательно, на востоке идет усиление потока из Тихого океана в Северный Ледовитый, а на западе – усиление потока с севера на юг. Также на всей рассматриваемой области наблюдается положительный тренд по температуре, что говорит о повышении температуры в подповерхностном и срединном слоях и небольшом повышении в придонном слое. В подповерхностном слое у западного побережья отмечается максимальный коэффициент тренда (0,05 °С в год). В западной части разреза по распределению коэффициента линейного тренда солёности воды отмечается распреснение воды, а около восточного побережья осолонение. Максимальное значение коэффициента тренда находится в срединном слое около восточного побережья (0.007 епс в год).

Таким образом, во временной изменчивости температуры, солёности и скорости воды присутствует тренд, в большей степени он выражается около обоих побережий – западного и восточного. Это определяет усилившуюся динамику в этом регионе.

Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Список литературы

- 1) Якшина Д.Ф., Голубева Е. Н. Исследование климатических изменений в Чукотском море и море Бофорта на основе численного моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 60–75. DOI: 10.48612/fpg/zkvg 71uu-xk44
- 2) Наумов Л.М., Гордеева С.М. Боковой перенос тепла и соли в Лофотенском бассейне: сравнение на основе трех баз данных // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13, № 3. С. 43–55. DOI: 10.7868/S207366732003003X
- 3) Игнатьев Д.Е. Средняя многолетняя оценка потоков, воды, тепла и соли через Берингов пролив // Гидрология и океанология — 2023: сборник материалов конференции Студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ (Санкт-Петербург, 20 апреля 2023 г.). – Казань: Бук, 2023. С. 184–191.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЁХМЕРНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЛН НА КОНЕЧНОЙ ГЛУБИНЕ

Фокина К.В.

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: прямое моделирование волн, конечная глубина, потенциал скорости, дисперсионное соотношение.

Изучение процесса развития волн на конечной глубине является актуальной задачей, имеющей важное прикладное значение. Кроме того, необходим точный прогноз ветровых волн в прибрежной зоне поскольку большие волны могут вызвать необычайный подъем среднего уровня моря или штормовой нагон, который часто играет решающую роль в прибрежных наводнениях. Мелководные районы фактически представляют собой другую физическую среду, где волны становятся более крутыми и, следовательно, более нелинейными. Спектр ветрового волнения и, как следствие, его эволюция в условиях конечной глубины имеют ряд особенностей [1,2].

В настоящей работе предлагается модификация разработанной ранее в [3] трёхмерной модели FWM, основанной на прямом моделировании эволюции поверхности и трёхмерного поля потенциала скорости, для исследования волн на конечной глубине. Трёхмерные уравнения потенциальных волн (уравнение Лапласа, кинематическое и динамическое граничные условия на свободной поверхности) записаны в нестационарной, следующей поверхности системе координат. Предыдущая версия модели была сформулирована для волн в глубоководных условиях. Расширение применимости модели на случай конечной глубины основано на модификации верхнего граничного условия для линейной компоненты вертикальной скорости.

Интегрирование по времени проводилось по схеме Рунге-Кутты четвёртого порядка с шагом по времени 0,01 в течение 10,000 временных шагов. Начальные условия задавались спектром JONSWAP [4] с обратным возрастом волны $U/C_p = 1$ (U - скорость ветра, C_p - фазовая скорость в пике спектра). Рассматривалось два варианта разрешения: 256x2 и 256x32 волновых мод в направлении горизонтальных координат, количество вертикальных уровней - 30. Такие значения разрешения и интервала времени позволяют обеспечить расчёт дисперсионного соотношения, затратив при минимально возможное количество вычислительных ресурсов.

Глубина в модели задавалась как $H_w = L_p/m$, где L_p - длина максимальной волны, m - параметр, который принимал значения от 1 до 9.

Для оценки корректности работы модели в новых условиях было проведено сравнение дисперсионных соотношений для глубоководных условий и для волн на произвольной глубине. Для каждого случая были также рассчитаны значения частоты методом наименьших квадратов на основе поля возвышения.

По результатам расчётов показано, что с уменьшением глубины отклонение значений линейного дисперсионного соотношения и дисперсионного соотношения, полученного для условий конечной глубины, становится более заметным в особенности в области низких волновых чисел, что согласуется с имеющимися теоретическими положениями. Кроме того, дисперсионное соотношение для каждого из рассмотренных значений глубины выполняется с удовлетворительной точностью, что доказано на основе значений фазовой скорости, рассчитанных методом наименьших квадратов. Точность сохраняется как при рассмотрении почти одномерных волн, так и волн, распространяющихся в разных направлениях. Основная задача работы заключалась в определении предельного значения глубины, при котором модель способна воспроизводит эволюцию волн. На основе проведённых расчётов был сделан вывод, что проведённая модификация модели позволяет воспроизводить эволюцию волн до глубины, равной $0,1L_p$ (длины максимальной волны).

Показано, что модель способна воспроизводить эволюцию волн на относительно небольших глубинах. При меньших значениях глубины происходит интенсивное обрушение волн, характер которого отличается от того, что описан численным алгоритмом, включённым в модель. Следует подчеркнуть, что основной целью работы на данном этапе являлась скорее проверка работы модели в условиях конечной глубины нежели изучение отдельных свойств волн и особенностей развития волнения на произвольной глубине. Предложенный метод моделирования может быть применён для развития моделирования волнового режима в реальных акваториях при условии использования механизмов учёта батиметрии бассейна и задания необходимых граничных условий.

Работа проведена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации (тема № FMWE-2024-0028).

Список литературы

- 1) Young I.R., Babanin A.V., The form of the asymptotic depth-limited wind-wave spectrum: Part II—the wavenumber spectrum // *Coastal Engineering*. № 56 (5–6). 2009. P. 534–542.
- 2) Bouws E., Günther H., Rosenthal W., et.al Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water: 1. Spectral form. // *Journal of Geophysical Research Oceans*. № 90 (C1). 1985. P. 985–986.
- 3) Chalikov D. Numerical modeling of surface wave development under the action of wind // *Ocean Science*. № 14 (3). 2018. P. 453–470.
- 4) Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint Sea Wave Project (JONSWAP) // *Tsch Hydrogh Z Suppl*. № A8 (12). 1973. P. 1–95.

ВЛИЯНИЕ УСВОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ВИХРЕВОЙ ДИНАМИКИ ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ В МОДЕЛИ МОРСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ

Фомин В.В.^{1,2,3}, Панасенкова И.И.^{1,3}

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва

²Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, г. Москва

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

Ключевые слова: Охотское море, Японское море, численное моделирование, усвоение данных наблюдений, температура поверхности моря, вихревая динамика.

В работе проведен анализ результатов расчетов морской циркуляции на акваториях Охотского и Японского морей, выполненный с использованием модели морской циркуляции с усвоением данных спутниковых наблюдений и без усвоения. Для воспроизведения морской циркуляции была использована модель INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1], реализованная с пространственным разрешением 3.5 км. Усвоение выполнялось методом ансамблевой оптимальной интерполяции EnOI (Ensemble Optimum Interpolation) [2]. В качестве данных по усвоению использовались спутниковые данные измерений температуры поверхности моря (ТПМ), предоставляемые европейской службой CMEMS (Copernicus Marine Service, продукт SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001). При усвоении ансамбль состоял из данных текущего расчета, а также данных архивных расчетов за тот же момент по времени, но за года с 1998 по 2021 гг. включительно. То есть общее количество членов ансамбля было принято равным 25. Расчеты проводились для 2021–2022 гг.

По результатам расчетов выполнено их сопоставление с данными наблюдений по ТПМ, показано, что эффективность алгоритма усвоения возрастает при усвоении не только в поверхностном слое, но и по толщине верхнего перемешанного слоя. Проанализирована изменчивость циркуляции в верхнем слое моря, выявлено влияние алгоритма усвоения ТПМ и оценен вклад в общую изменчивость циркуляции и вихревой динамики на акваториях Охотского и Японского морей с учетом ее пространственной и временной изменчивости.

Работа выполнена в рамках плана НИОКТР тема № АААА-А20-120021890121-5 (Разработка и усовершенствование моделей, методов и технологий прогнозирования гидрометеорологических характеристик акваторий Мирового океана, морей и морских устьев рек России). Численные расчеты проведены с использованием оборудования Межведомственного многопроцессорного суперкомпьютерного центра РАН [<http://www.jscc.ru/>] и на суперкомпьютере XC40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета».

Список литературы

- 1) Дианский Н.А., Фомин В.В., Чумаков М.М., Степанов Д.В. Ретроспективные расчеты циркуляции и ледяного покрова Охотского моря на основе современных технологий численного моделирования // Вести газовой науки. –2017. –№ 4(24). –С.82-93
- 2) Castruccio, F.S. An EnOI-based data assimilation system with DART for a high-resolution version of the CESM2 ocean component / Castruccio F.S., Karspeck A.R., Danabasoglu G., Hendricks J., Hoar T., Collins N., Anderson J.L. // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. –2020. –vol. 12.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ЕГО УРОВНЯ И СТОКА РЕК

Фомин В.В.^{1,2,3}, Коршенко Е.А.¹, Панасенкова И.И.^{1,3}

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва

²Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, г. Москва

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

Ключевые слова: Каспийское море, циркуляция, сток рек, уровень моря, численное моделирование.

За последний 30-летний климатический период среднегодовой уровень Каспийского моря составил -27.36 м за период с 1992 по 2022 гг., минимальное его значение опускалось до -28.68 м, а максимальное поднималось до -26.57 м. С учетом мелководности Северного Каспия и пологого склона берега такие изменения уровня моря приводят к изменению площади зеркала Каспийского моря: в сравнении со средним случаем к уменьшению на 10% для минимального и увеличению на 5% для максимального случаев. Изменения площади зеркала и общей глубины Каспийского моря приводят к изменениям циркуляции Каспийского моря. Аналогично изменениям среднегодового влияния уровня Каспийского моря, на его гидрологический режим оказывает влияние и речной сток. За период с 1989 по 2020 гг. речной сток р. Волги изменялся в пределах от 5568 м³/год до 10460 м³/год, то есть речной сток мог меняться почти в 1.9 раз.

В настоящей работе проводится анализ изменений гидрологического режима Каспийского моря, который может быть вызван изменениями уровня Каспийского моря и его речным стоком. Исследование выполняется с использованием физически полной 3-х мерной модели морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [2]. Для оценки влияния изменений среднего уровня моря на циркуляцию расчеты выполняются для календарного года с использованием одинаковых данных по атмосферному воздействию. В качестве таких данных используются данные т.н. «нормализованного года», доступные в CORE (Coordinated Ocean-Ice Reference Experiment).

Для оценки влияния изменений уровня моря на гидрологический режим рассматриваются 3 сценария расчетов при разном уровне моря (и, соответственно, площади зеркала Каспийского моря), наблюдавшемся за период с 1992 по 2022 гг.: среднем, равным - 27.36 м, минимальном, равным -28.68 м и максимальном, равным -26.57 м.

Аналогично, для оценки влияния изменений речного стока на гидрологический режим, рассматриваются 3 сценария расчета с минимальным речным стоком, равным 5568 м³/год, средним речным стоком, равным 7878 м³/год, и максимальным речным стоком, равным 10460 м³/год. Расчеты проводились в предположении среднего уровня Каспийского моря за период с 1989 по 2020 гг.

Анализ полученных результатов расчетов показал, что как изменение среднегодового уровня Каспийского моря, так и изменение стока рек оказывает влияние на циркуляцию вод всего моря, на его соленостный и температурный режим. Изменение уровня моря приводит к разнице в средних значениях скоростей течений в 5 см/с в северном Каспии, а в максимальных разница может достигать до 30-45 см/с. При повышении уровня моря средние скорости течений возрастают, увеличение скоростей течений наблюдается, преимущественно в западной части северного Каспия, в устьевой области р. Волга. При максимальном уровне Каспийского моря в центральной части Северного Каспия наблюдается повышение солености на 1–3 е.п.с., и ее уменьшение в прибрежной зоне в юго-восточной части Северного Каспия. При минимальном уровне наблюдается меньшее

поступление пресных вод в северо-восточную часть Каспия, что приводит также к повышению солености на 2–4 е.п.с.

По результатам расчетов было получено, что наибольшее влияние изменение речного стока оказывает, непосредственно на акваторию северного Каспия, где сток р. Волги, главным образом, определяет соленостный режим. Наибольшая разница в значениях расположена на широте $\sim 45^\circ$ с.ш. на некотором удалении от устья р. Волги. Максимальные положительные амплитуды в изменении солености в северном Каспии достигают 2.5 е.п.с., при этом наблюдается как осолонение, когда речной сток минимален относительно среднего речного стока, так и распреснение, когда речной сток максимален. Под действием силы Кориолиса, с учетом общей структуры течений Каспийского моря, распресненные или более соленые воды могут распространяться в средний и южный Каспий. За год аномалии солености выше 0.5 е.п.с могут наблюдаться на широтах $42 - 42.5^\circ$ с.ш., а область с положительной или отрицательной аномалией солености доходит в том числе и до акватории южного Каспия. Дополнительный вклад в положительные аномалии солености вносят и остальные реки Каспийского моря – этот вклад прослеживается в виде областей повышенных аномалий солености, приуроченных, в основном, к устьевым зонам. В среднем Каспии было обнаружено, что аномалии солености проявляются также и в виде вихревых структур, что говорит о возможности как захвата вихрями более соленых или пресных вод, так и более интенсивного вихреобразования. Наибольшие изменения в температуре воды наблюдаются в среднем Каспии, их характерные значения составляют $0.2-0.4^\circ\text{C}$. В северном Каспии изменения незначительны и не превышают 0.1°C , что связано с его мелководностью.

Полученные результаты позволяют констатировать, что для акватории Каспия, с учетом большого поступления речного стока, который обладает большой сезонной и межгодовой изменчивостью, учет плотностных эффектов, их изменчивости на синоптическом, сезонном и межгодовом масштабах крайне важен для более точного воспроизведения как направления течений, так и его абсолютных значений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-27-00800.

Список литературы

- 1) Фомин В. В., Дианский Н. А., Коршенко Е. А., Выручалкина Т. Ю. Система оперативного диагноза и прогноза гидрометеорологических характеристик Каспийского моря и оценка точности прогнозов по данным натурных измерений // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 9. – С. 49–64.

АНАЛИЗ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЗАТОПЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫХ ТЕРРИТОРИЙ П-ОВА КАМЧАТКА

Фомин В.В.^{1,2,3}, Панасенкова И.И.^{1,3}, Дианский Н.А.^{1,2,4}, Кабатченко И.М.¹, Землянов И.В.¹

¹Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Росгидромет, г. Москва

²Институт вычислительной математики имени Г.И. Марчука РАН, г. Москва

³Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации, г. Москва

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: Охотское море, Октябрьская коса, гидрометеорологический режим, затопление, численное моделирование

Прибрежная зона п-ова Камчатка характеризуется сложными и суровыми гидрометеорологическими условиями. Это связано как с прохождением интенсивных циклонов и фронтов, которые приводят к штормовым сгонно-нагонным колебаниям и ветровому волнению, интенсификации скоростей прибрежных течений, так и общим гидрологическим режимом, для которого характерно наличие интенсивных приливных колебаний, градиентных и стоковых течений. Сочетание неблагоприятных явлений на отдельных прибрежных участках может приводить к подтоплению или затоплению прибрежных территорий, при этом частота подобных событий будет возрастать, т.к. из-за климатических изменений наблюдается постепенный рост уровня моря Мирового океана.

В настоящей работе рассматривается прибрежный участок п-ова Камчатка – Октябрьская коса, расположенный на западном побережье п-ова Камчатка, для которого наблюдается его периодическое подтопление. В работе представлен анализ гидрометеорологического режима прибрежной зоны, проведены расчеты по возможности её подтопления.

Работа выполнена с использованием комплекса численных моделей, включающего: модель атмосферной циркуляции WRF (Weather Research and Forecasting Model) [6], реализованную для акватории исследования с пространственным разрешением 3 км, модель ветрового волнения РАВМ (Российская Атмосферно-Волновая модель) [2], реализованную для акватории изысканий с пространственным разрешением 100~110 м, а также модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1] с пространственным разрешением ~100 м в районе работ. Необходимость проведения отдельных исследований гидрометеорологического режима для локального района с использованием моделей высокого пространственного разрешения обусловлена сложностью и разнообразием гидрометеорологических условий, характерных для различных частей Охотского моря [3, 4, 5].

Модели были верифицированы по данным наблюдений с прибрежных станций, а также по доступным данным полевых изысканий. Результаты верификации показали, что в среднем коэффициент корреляции составляет 0.78 для модуля скорости ветра, 0.83 для зональной компоненты скорости ветра, 0.81 для меридиональной компоненты скорости ветра, 0.99 для давления на уровне моря, 0.99 для температуры воздуха, 0.95 для модуля скорости течений, 0.87 и 0.99 для зональной и меридиональной компонент скорости течений, 0.98 для уровня моря, 0.78 для значительной высоты волны. Среднеквадратичное отклонение составляет 1.27 м/с для модуля скорости ветра, 1.37 м/с для зональной компоненты скорости ветра, 1.43 м/с для меридиональной компоненты скорости ветра, 0.84 гПа для давления на уровне моря, 1.48 °С для температуры воздуха, 0.12 м/с для модуля скорости течений, 0.06 м/с и 0.09 м/с для зональной и меридиональной компонент скорости течений, 0.13 м для уровня моря. Средняя ошибка воспроизведения значительной высоты волны составляет 0.17 м. Полученные результаты показывают высокое качество результатов расчетов и могут быть использованы для получения оперативных и экстремальных значений гидрометеорологических характеристик.

С использованием адаптированных к региону моделей атмосферной и морской циркуляции, ветрового волнения было проведено ретроспективное моделирование гидрометеорологического режима за 30-летний период и выполнен анализ гидрометеорологического режима. С использованием полученных результатов и с учетом данных ИПСС (Intergovernmental Panel on Climate Change) по уровню моря и его изменениям были проведены расчеты по оценке возможности затопления Октябрьской косы. Результаты расчетов показали, что в среднем вдоль косы происходит до 5 переливов в год. Прогнозные оценки показывают, что вследствие повышения уровня моря и изменения гидрологических условий можно ожидать увеличения частоты переливов, которое в среднем вдоль косы Октябрьской составит 18% к 2050 г., 43% к 2100 г., 55% к 2120 г., 82% к 2150 г. Полученные результаты показывают, что при отсутствии активного техногенного вмешательства и при сохранении текущих климатических условий будет наблюдаться тенденция к ухудшению условий эксплуатации дороги, пролегающей вдоль косы Октябрьской. Увеличение частоты переливов приведет как к увеличению периодов времени, в течение которых будет невозможно ее использовать, так и к более активному размыву и разрушению дорожного полотна.

Численные расчеты проведены с использованием оборудования Межведомственного многопроцессорного суперкомпьютерного центра РАН [<http://www.jssc.ru/>].

Список литературы

- 1) Дианский Н.А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия. М.: Физматлит, 2013. 272 с.
- 2) Кабатченко И.М., Матушевский Г.В., Резников М.В., Заславский М.М. Моделирование ветра и волн при вторичных термических циклонах на Черном море // Метеорология и гидрология. 2001. № 5. С. 61-71.
- 3) Новиненко Е. Г., Шевченко Г. В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50–60.
- 4) Хен Г.В., Ванин Н.С., Фигуркин А.Л. Особенности гидрологических условий в Северной части Охотского моря во второй половине 90-х гг. Известия Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра. т. 130, с. 24 – 43, 2002
- 5) Проект Моря. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том IX. Охотское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия. Под редакцией Глуховского, Гоптарева, Терзиева. Санкт-Петербург, 1998 г., 320 с.
- 6) Skamarock W.C. et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Notes. 2008.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ КЛИМАТИЧЕСКОГО ИНДЕКСА БАЛТИЙСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ

Харина А.И., Воронкова М.С., Хаймина О.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: физика океана, составляющие интегрального климатического индекса, цикличность, Баренцево море, Балтийское море.

В данном исследовании была проанализирована изменчивость основных характеристик интегрального климатического индекса В. Д. Бойцова [1] для Балтийского и Баренцева морей за последние 50 лет. Понимание межгодовой изменчивости составляющих климатического индекса выбранных акваторий позволяет лучше понять региональные особенности климата, выявить долгосрочные тенденции и определить взаимосвязи между различными климатическими факторами, что необходимо для рационального природопользования и прогнозирования будущих изменений климата региона.

Для проведения исследования использовались следующие исходные данные: срочные показатели температуры воздуха, полученные из архива "Погода и климат", для станций Санкт-Петербург, Калининград, Хайлуото в акватории Балтийского моря, а также для станций Мурманск, Свальбард и Малые Кармакулы в акватории Баренцева моря. Станция Свальбард не находится на побережье Баренцева моря, однако была использована для оценки условий в северо-западной части моря из-за непосредственной близости к акватории. Также были использованы среднемесячные значения температуры поверхности океана (ТПО) в узлах сетки 2x2 градуса для каждого моря, полученные из архива NOAA NCDC ERSST версии 5 (Extended reconstructed sea surface temperature data). Вместе с тем, была исследована изменчивость хода морского льда: для Баренцева моря данные о протяженности морского льда были взяты из архива NOAA Barents Sea Ice Extent (1978-2023), для Балтийского моря максимальная площадь морского льда взята из архива Finnish Meteorological Institute. Полученные данные были проанализированы с использованием различных методов статистической обработки данных.

В ходе работы было выявлено, что за период с 1972 по 2022 гг. ход температуры поверхности океана в Баренцевом и Балтийском морях, как и температуры воздуха, хорошо согласованы между собой, коэффициент корреляции в обоих случаях превышает 0.7.

В динамике температурных показателей Баренцева моря за исследуемый период были выявлены следующие закономерности: 4-6 лет; 9-11 лет. Начиная с 2013 г., наблюдается цикл со средней продолжительностью 2-3 года. Также просматривается 22-летний цикл [2], в который уместается два цикла 10-11 лет, что связано с циклами солнечной активности [3].

При исследовании изменчивости хода ТПО и хода температуры воздуха Балтийского моря, также были выявлены следующие циклические колебания: 2-4 лет; 7-8 лет; 10-12 лет, о которых упоминается в работе А.П. Педченко и В.Д. Бойцова [4]. Также можно наблюдать 22-летний цикл.

Изменения в ходе температуры воздуха и в ходе ТПО как в Баренцевом, так и в Балтийском морях происходят с разной скоростью. Обнаруживается явление запаздывания в изменении температуры поверхности океана относительно температуры воздуха. Также следует отметить, что циклические колебания температуры поверхности океана имеют более продолжительный характер по сравнению с температурой воздуха.

Была рассмотрена изменчивость ледовитости выбранных акваторий в течение рассматриваемого периода. Циклы в ходе температурных характеристик, которые были отмечены ранее, также присущи ходу изменчивости ледовитости в обоих морях, однако с 2013 года в Баренцевом море

отсутствуют ранее выделенные двухлетние циклы, которые были отмечены в температуре воздуха и поверхности океана. Была установлена отрицательная взаимосвязь между температурой и ледовитостью. В последнее время наблюдается значительное повышение температуры, что существенно влияет на уровень ледовитости. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению колебаний ледового покрова из-за сокращения его площади.

При анализе временных рядов составляющих климатического индекса в Баренцевом и Балтийском морях за период с 1972 по 2022 гг., были выявлены общие циклические закономерности. Несмотря на схожесть в периодичности циклов, в Балтийском море отмечается более выраженная цикличность, по сравнению с Баренцевым морем. Это объясняется тем, что Баренцево море является окраинным, подверженным влиянию глобальной океанической системы, в то время как Балтийское море относится к внутриматериковому типу, что делает происходящие в нем изменения более устойчивыми.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FSZU-2023-0002 на базе Российского государственного гидрометеорологического университета.

Список литературы

- 1) Бойцов В.Д. Изменчивость температуры воды в Баренцевом море и ее прогнозирование. М.: ПИНРО, 2006. С. 292-293.
- 2) Дроздов О. А. Циклические колебания осадков и температуры, используемые в сверхдолгосрочных прогнозах, в формировании которых, возможно, участие солнечной активности. — Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова 1975 №354 Общая и синоптическая климатология ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ ЛЕНИНГРАД, 1975
- 3) Хаймина О. В. Циклические изменения климата в северо-западных морях России / О. В. Хаймина, В. Д. Бойцов, И. П. Карпова // Глобальные климатические процессы и их влияние на экосистемы арктических и субарктических регионов : Тезисы докладов Международной научной конференции, Мурманск, 09–11 ноября 2011 года. – Мурманск: Кольский научный центр РАН, 2011. – С. 193-194.
- 4) Педченко А.П., Бойцов В.Д. Особенности многолетней динамики климата и её влияние на распределение и промысел сельдевых видов рыб Балтийского моря. В: Труды ВНИРО, (Т. 180): Вопросы промысловой океанологии, 2020г. – С. 225.

АНАЛИЗ ИЗМЕНЧИВОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РАЙОНЕ АЛЕУТСКОЙ ГРЯДЫ НА ОСНОВЕ ЛАГРАНЖЕВА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Худякова С.П.¹, Удалов А.А.², Будянский М.В.², Белоненко Т.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Алеутская гряда, мезомасштабные вихри, водообмен, AVISO, AMEDA, GLORYS12

Алеутскими вихрями называют мезомасштабные вихри, формирующиеся в северной части Тихого океана к югу от Алеутской гряды между 170° в.д. и 170° з.д. Вихри формируются над Алеутским желобом в районе 50°–52° с.ш., продвигаются на юго- или северо-запад после отделения от Аляскинского течения и проходят через Западный Субарктический круговорот, перенося трансформированные воды залива Аляска в западную часть тихоокеанской Субарктики [5]. В дополнение к водообмену между регионом Алеутских островов и западной и центральной частями Тихоокеанской Субарктики, вихри Аляскинского течения могут влиять на водообмен между северной частью Тихого океана и Беринговым морем [3]. Отмечается, что антициклонические вихри распространяются вдоль шельфовой зоны Алеутских островов, а траектории циклонических вихрей расположены южнее — вдоль Алеутского жёлоба [1,6].

Был применен метод автоматического выявления вихрей Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA), основанный на использовании альтиметрического геострофического поля скорости [2]. Контура мезомасштабных вихрей размером более 50 км идентифицируются в поле скорости AVISO с разрешением 0,25°x0,25° и суточным шагом по времени. Для анализа термических и гидрохимических параметров вод были использованы массивы GLORYS12V1 и Global Ocean Biogeochemistry Hindcast, доступные на портале европейского агентства Copernicus. Выбранные массивы включают в себя суточные значения температуры, солености и хлорофилла на горизонте 1,5 метра за период 2021–2023 гг., отображенные на стандартной регулярной сетке с пространственным разрешением 1/12° и 1/4° соответственно. Вертикальные профили температуры и солености в контурах отдельных вихрей были взяты из базы данных международного проекта океанологических станций ARGO.

Были проанализированы параметры долгоживущих (с периодом жизни более 30 суток) антициклонических и циклонических вихрей за период с 2021 по 2023 г., сформированных к западу и востоку от 180°. Среднемесячные концентрации хлорофилла в контурах вихрей отражают трехпиковое «цветение» в мае, августе и октябре. За исключением антициклонических вихрей восточного сектора, в контурах которых отмечается двухпиковое «цветение» в мае и сентябре. Максимальная концентрация хлорофилла в контурах вихрей западного сектора наблюдаются в мае и для антициклонических вихрей составляет 1,3 мг/м³, а для циклонических вихрей равна 0,85 мг/м³. При этом районы с концентрацией хлорофилла более 1 мг/м³ можно считать высокопродуктивными [4]. Вихри западного сектора содержат воду с более высокими концентрациями хлорофилла, чем вихри восточного сектора. Отмечено наличие антициклонических вихрей к югу от архипелага, переносящих на периферии воды с высокой концентрацией хлорофилла (более 1 мг/м³) на юго-запад. Описано распространение вод, мигрирующих через проливы Алеутской гряды: заток вод из Тихого океана в Берингово море происходит в течение весенне-зимнего периода, а заток вод из Берингова моря в Тихий океан наблюдается преимущественно с конца лета до середины осени.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №23-17-00068.

Список литературы

- 1) Khudyakova S.P., Travkin V.S., Belonenko T.V. Topographic Waves of the Aleutian Trench // All-Russian Conference of Young Scientists «Complex Investigation of the World Ocean». – Cham: Springer Nature Switzerland. – 2023. – P. 150-159.
- 2) Le Vu B., Stegner A., Arsouze T. Angular Momentum Eddy Detection and tracking Algorithm (AMEDA) and its application to coastal eddy formation // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2018. – V. 35. – No. 4. – P. 739-762.
- 3) Ueno H., Freeland H.J., Crawford W.R., Onishi H., Oka E. Anticyclonic eddies in the Alaskan Stream // Journal of physical oceanography, 2009. – V. 39. – No. 4. – P. 934-951.
- 4) Мордасова Н.В. Некоторые данные о содержании хлорофилла в продуктивных зонах Мирового океана // Океанографические исследования промысловых районов Мирового океана, 1980. – С. 6.
- 5) Пранц С.В. Вихри глубоководных желобов северо-западной части Тихого океана: обзор // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана, 2021. – Т. 57. – №. 4. – С. 387–400.
- 6) Худякова С.П., Травкин В.С., Белоненко Т.В. Мезомасштабные вихри Алеутского жёлоба // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2023. – Т. 20. – №6. – С. 211–221.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ В XX-XXI ВЕКАХ ПО НАТУРНЫМ И МОДЕЛЬНЫМ ДАННЫМ

Цедрик С.В.^{1,2}, Май Р.И.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

² Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ледовитость, MPI-ESM1-2-HR, AWI-CM-1-1MR, NOAA-CIRES-DOE 20th Century Reanalysis V3, оценка качества моделей

Ледовитость является одним из основных параметров, описывающих состояние ледяного покрова различных акваторий. Определяется она как отношение площади, занятой льдом любой сплочённости, к общей площади акватории. Простота расчёта обуславливает частоту использования показателя в исследовательской работе как для считывания сезонного хода и межгодовых изменений состояния ледяного покрова, так и для верификации модельных данных либо данных реанализа.

В настоящей работе рассчитывается ледовитость по пяти источникам данных. Как основа для сравнения используются спутниковые данные архивов NSIDC DAAC (26 октября 1978 – 31 марта 2023; пространственная дискретность – 25x25 км, временная – 1 сутки; данные собраны сенсорами SMMR, SSM/I, SSMIS на спутниках программы DMSP, а также спутнике Nimbus-7) и OSISAF (код продукта OSI-401-d; 1 марта 2005 года – настоящее время; пространственная дискретность – 10x10 км, временная – 1 сутки; данные собраны сенсором SSMIS на спутниках программы DMSP).

Для сравнения и верификации используются модельные данные международного проекта CMIP (Coupled Model Intercomparison Project). Из более чем 40 моделей шестой фазы проекта были выбраны две, предоставляющие необходимые данные и подходящие по пространственному и временному разрешению – MPI-ESM1-2-HR и AWI-CM-1-1-MR институтов Макса Планка и Альфреда Вегенера соответственно. Также используется реанализ двадцатого века NOAA-CIRES-DOE.

В работе с помощью расчёта основных статистических характеристик, построения автокорреляционных функций и расчёта спектральной плотности временных рядов выполняется сравнение модельных данных различных сценариев со спутниковыми. Выявлено, что используемые модели недостаточно точны в отображении ледяного покрова Арктических морей. Значительно затрудняет работу тот факт, что в рамках одной модели для различных морей или различных сезонов года наиболее точными могут оказаться различные сценарии. Дополнительно исследуются долгопериодные колебания ледовитости, результаты сравниваются с полученными другими исследователями [1,2,3].

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Российского Научного фонда в рамках научного проекта № 23-19-00039.

Список литературы

- 1) Lopes F., Courtillot V., Gibert D., Mouël J. On the annual and semi-annual components of variations in extent of Arctic and Antarctic sea-ice // *Geosciences*, 2023. – 13. – 21.
- 2) Song M. Change of Arctic sea-ice volume and its relationship with sea-ice extent in CMIP5 simulations // *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015. – 9. – 1. – P. 22-30, DOI: 10.1080/16742834.2015.1126153.
- 3) Вязигина Н.А., Тимохов Л.А., Егорова Е.С., Юлин А.В. Информативность гидрометеорологических и астрогеофизических факторов в задаче описания межгодовых колебаний ледовитости Гренландского моря // *Лёд и снег*, 2021. – Т. 61. – № 3. DOI: 10.31857/S2076673421030099.

ЦУНАМИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ 1 ЯНВАРЯ 2024 ГОДА

Цуканова Е.С., Медведев И.П., Владимирова И.С., Медведева А.Ю.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: цунами, Японское море, Приморский край.

1 января 2024 г. в 7:10 UTC в Японском море произошло землетрясение с магнитудой M_w 7.5 (*2024 Noto Peninsula Earthquake*). Событие произошло в префектуре Исикава (пос. Анамизу) и стало первым крупным событием с объявлением опасности цунами в Японии после землетрясения в 2011 г. В результате землетрясения погибло более 220 человек. Землетрясение вызвало волны цунами, распространившиеся по всей акватории Японского моря с заплесками до 6 м на побережье Японии. Первые волны цунами достигли побережья уже менее чем через 1 мин после начала землетрясения. Волны цунами также привели к значительным разрушениям, вызвав повреждение линий связи и наводнения.

Очаг землетрясения располагался на западном склоне Японской островной дуги, а его механизм представлял собой взброс. Косейсмические деформации в очаговой зоне достигли 6 метров, а высота волн цунами в ближней зоне составила более 1 м. В результате землетрясения произошло заметное изменение рельефа: около порта в г. Вадзима береговая линия сдвинулась на 250 м вглубь моря; в некоторых районах произошло поднятие дна и осушение.

В рамках исследования было проведено моделирование распределенной сейсмической подвижки в очаге землетрясения на основе спутниковых геодезических данных и рассчитаны вертикальные смещения дна, пересчитанные в возмущение уровня моря. Для уточнения источника цунами было проанализировано более 40 российских, корейских и японских записей мареографов. Расчет распространения волн цунами производился при помощи численной гидродинамической модели И.В. Файна [1,3], схожей с моделью TUNAMI [2]. За основу для рельефа дна взят массив базы данных GEBCO 2014.

Значительные волны цунами наблюдались не только на восточном побережье моря, но и на западном. Так, например, высоты волн (зафиксированные на мареографах) составили ~60 см в Преображении, ~50 см в Рудной пристани, ~80 см в Сокхчо и ~150 см в Мукхо. С помощью численного гидродинамического моделирования были рассчитаны высоты цунами для всего российского побережья Японского моря.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 24-17-00313.

Список литературы

- 1) Fine I.V., Kulikov E.A., Cherniawsky J.Y. Japan's 2011 tsunami: Characteristics of wave propagation from observations and numerical modelling // *Pure and Applied Geophysics*. 2013. V. 170. P. 1295–1307. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0555-8>
- 2) Imamura F. Review of tsunami simulation with a finite difference method // In: *Long-wave runup models*. / Eds. Yeh H. et al. World Scientific Publ., Singapore, 1996. P. 25–42.
- 3) Rabinovich A.B., Lobkovsky L.I., Fine I.V. et al. Near-source observations and modeling of the Kuril Islands tsunamis of 15 November 2006 and 13 January 2007 // *Advances in Geosciences*. 2008. V. 14. P. 105–116. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-105-2008>

ТИПЫ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В ПЕРИОД КРУГЛОГОДИЧНОЙ НАВИГАЦИИ В ВОСТОЧНО-СИБИРСКОМ МОРЕ

Шаратунова М.В., Юлин А.В., Иванов В.В.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Северный морской путь, Восточно-Сибирское море, ледовые условия, круглогодичная навигация, возрастной состав льда, ледяные массивы.

В настоящее время большинство рейсов в восточном направлении по трассам Северного морского пути (СМП) начинаются в конце июня и заканчиваются обычно в ноябре. В связи с изменением ледовых условий в арктических морях и ростом грузооборота на трассе СМП стало возможным расширение навигационного периода для плавания судов (проведены успешные пробные сверхранние и сверхпоздние рейсы). С 2024 года планируется переход к круглогодичной навигации по трассам плавания СМП.

Целью работы является оценка возможной круглогодичной навигации и обобщение имеющихся данных о ледовых условиях Восточно-Сибирского моря.

На протяжении всего навигационного периода в восточной части Восточно-Сибирского моря по сравнению с другими морями формируются самые неблагоприятные условия плавания. Вторжение старых льдов на трассы плавания, сжатие льда, наличие торосов и стамух приводят к развитию ледовых условий по неблагоприятному типу, на трассах плавания могут формироваться тяжелые или экстремальные (очень тяжелые) условия плавания [1].

Согласно «Правилам плавания в акватории СМП», основными критериями допуска судов на СМП являются категория ледовых усилений судна (ледовый класс) и тип ледовых условий в районе моря [2]. В данной работе для оценки ледовой обстановки и обеспечения безопасности плавания судов в зимний и летний периоды использовались критерии, разработанные в ФГБУ ААНИИ. Основной целью типизации является выделение трех типов ледовых условий – легкий, средний, тяжелый [3].

В качестве исходных данных использовались цифровые региональные ледовые карты Центра «Север» ГНЦ «ААНИИ» Восточно-Сибирского моря за период 1997-2023 гг.

В зимний период (октябрь-май) для оценки ледовых условий рассчитывался возрастной состав ледяного покрова (толщина) с помощью ГИС-технологий, учитывались текущие метеорологические (атмосферное давление, температура воздуха) и ледовые параметры (толщины льда на полярных станциях, сроки устойчивого ледообразования и становления припая, дрейф льда). Из работы по возрастному составу [4] видно, что ледообразование начинается позже, а сроки перехода между возрастными градациями сместились на 1–2 декады на более поздний срок. Оценка возрастного состава ледяного покрова к концу зимнего периода (в мае) показала преобладание однолетнего толстого льда в дрейфующих и припайных льдах. Средняя за сезон толщина припая на полярных станциях сократилась на 12 % за 15-летний период с 2005 г. За период 2005–2020 гг. повторяемость умеренных зим составила 25%, мягких- 75%, суровых зим не наблюдалось. В среднем по всем станциям моря показатель СГДМ сократился на 14 %.

В летний период (июнь-сентябрь) хорошими показателями для расчета и анализа ледовых условий плавания в Восточно-Сибирском море являются: сплоченность ледяного покрова, площадь районов моря, освобождающаяся ото льда в период таяния, сроки взлома припая, интенсивность сокращения ледовитости моря и положение границы дрейфующих и сплоченных льдов, а также Новосибирского и Айонского массивов [5].

Основные результаты исследования показывают наличие устойчивого тренда уменьшения ледовитости и площадей ледяных массивов в летний период. Повторяемость «легкого» типа составляет 47 % для Новосибирского ледяного массива и 33 % для Айонского. Реализация повторяемости

«тяжелого» типа развития площадей массивов была значительно ниже 3–17 %. Существенно изменяет условия плавания судов в легкую сторону смещение границ дрейфующих и сплоченных льдов в северном направлении.

Таким образом, приведенные исследования ледовых условий Восточно-Сибирского моря свидетельствуют о более легких ледовых условиях и возможности обеспечения плавания судов в зимний период. Однако, в настоящее время используемые критерии определения типов ледовых условий не учитывают ряд важных параметров, имеющих большое значение для судоходства: дрейф и сжатия льдов, нарушения сплошности, торосистость, разрушенность и др. [6]. Поэтому возможно возникновение сложных условий ледового плавания на фоне лёгких ледовых условий в акватории моря и наоборот. С практической точки зрения, гарантированное безопасное плавание в восточном направлении в зимний период возможно только при наличии ледокольной проводки с учетом гидрометеорологического и ледового информационного сопровождения морских операций.

Работа выполнена в рамках бюджетной темы Росгидромет НИТР 5.1, ААНИИ 05 26 25, 2020-2024 гг.

Список литературы

- 1) Шаронов А. Ю., Шматков А.Ю. Задачи гидрометеорологического обеспечения круглогодичной навигации в Восточно-Сибирском море // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2018. -Т.10. № 1. С.170–182.
- 2) Правила плавания в акватории Северного морского пути. Москва, 2020 .34 с
- 3) Разработка методики долгосрочного прогноза типов ледовых условий в семи районах арктических морей Северного морского пути для зимнего периода навигации (октябрь-июнь). Шифр отчета 1.5.1.4. ЦНТП Росгидромета 2019 гг.
- 4) Sharatunova M.V., Ivanov V.V. Estimation of Ice Age Categories Composition in the East Siberian Sea at the End of Winter Period// Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023), SPEES, 2023.
- 5) Юлин А.В., Шаратунова М.В., Павлова Е.А., Иванов В.В. Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т.64. №3(117). С.229-240.
- 6) Миронов Е.У., Клячкин С.В., Макаров Е.И., Юлин А.В., Афанасьева Е.В. Особенности ледовых процессов в осенний период 2021 г. в морях Российской Арктики и оценка оправданности ледовых прогнозов // Российская Арктика. 2021. № 15. С. 40-53.

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОГО УСИЛЕНИЯ НА ПРИЛИВНЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАЛИФОРНИЙСКОГО ЗАЛИВА

Ширыборова А.И.^{1,2}, Медведев И.П.², Архипкин В.С.¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: приливы, сейши, спектральный анализ, гармонический анализ, гидродинамическая модель, задача на собственные значения

Приливные колебания уровня Калифорнийского залива представляют большой интерес для исследования. На настоящее время накоплены многолетние качественные массивы данных об уровне моря, на основе которых можно выполнить подробный анализ колебаний уровня Калифорнийского залива. Большинство современных работ сосредоточены на отдельных частях залива и не рассматривают его целиком [1, 2]. Калифорнийский залив имеет схожую геометрию с бассейном Адриатического моря, где аномально высокие приливы связаны с резонансным усилением [3]. Некоторые исследователи упоминают усиление, но не объясняют его природу [4, 5]. В данной работе на основе многолетних ежечасных наблюдений был выполнен детальный анализ приливных колебаний уровня залива и исследовано влияние резонансного усиления на аномально высокие приливы в заливе.

Данная работа основана на длительных ежечасных данных наблюдений на 18 береговых пунктах измерения уровня моря Калифорнийского залива, взятых с портала Центра уровня моря Гавайского университета (University of Hawaii Sea Level Center, UHSLC). Результаты исследования получены при помощи гармонического и спектрального анализов. В рамках работы проводилось моделирование с помощью двумерной версии численной океанической модели ADCIRC.

С помощью гармонического анализа были рассчитаны амплитуды и фазы основных приливных гармоник сначала для отдельных годовых серий, после чего проводилось векторное осреднение за весь период наблюдений. Данный подход позволяет улучшить точность фаз и амплитуд исследуемых гармоник. Амплитуда главной полусуточной гармоники M_2 менялась от 0.13 м в центре залива до 1.6 м в вершине залива, S_2 – от 0.1 до 0.9 м. Амплитуда суточной гармоники K_1 варьируется от 0.16 м на входе в залив до 0.4 м в вершине, O_1 – от 0.1 до 0.25 м. Максимальный рассчитанный размах приливных колебаний по данным береговых наблюдений составляет 6.85 м и отмечается на станции Сан-Фелипе вблизи вершины залива. Тип (характер) прилива меняется от смешанного преимущественно полусуточного на входе в залив и в вершине залива, до преимущественно суточного в центральной части залива.

С помощью двумерной гидродинамической модели ADCIRC были рассчитаны приливы для 1973 г. и получены поля ежечасных значений приливных изменений уровня моря на всей площади залива. На основе массива глубин GEBCO была подготовлена расчетная сетка. На открытой границе задавались значения гармонических постоянных M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1 , P_1 , Q_1 из глобальной приливной модели FES2014. Был выполнен гармонический анализ и построены карты пространственного распределения амплитуд и фаз вычисляемых гармоник. По данным численного моделирования максимальный размах прилива составляет 7.5 м и наблюдается в вершине залива. Расхождения в значениях максимального размаха между результатами численного моделирования и данных натурных наблюдений обусловлены различием географического положения узлов вычислительной сетки и береговых мареографов.

Для изучения возможного резонансного усиления для каждой станции был рассчитан статический отклик («equilibrium response») для отдельных приливных гармоник, который представляет собой отношение наблюдаемой амплитуды гармоники к теоретической, значение которой определяется разложением приливного потенциала. Выявлено усиление отклика приливных гармоник

при перемещении от центральной части залива к его вершине, но ярко выраженного усиления в зависимости от частоты приливной гармоника обнаружено не было.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-17-00313.

Список литературы

- 1) Filonov A. E., Lavín M. F. Internal tides in the Northern Gulf of California //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2003. – V. 108. – № C5.
- 2) Zaytsev O., Rabinovich A. B., Thomson R. E. Intense diurnal surface currents in the Bay of La Paz, Mexico //Continental Shelf Research. – 2010. – V. 30. – № 6. – P. 608-619
- 3) Medvedev I. P., Vilibić I., Rabinovich A. B. Tidal resonance in the Adriatic Sea: Observational evidence //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. – V. 125. – № 8. – e2020JC016168
- 4) Salas-de-León D. A. et al. Residual circulation and tidal stress in the Gulf of California // Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2003. – V. 108. – № C10.
- 5) Roden G. I., Groves G. W. Recent oceanographic investigations in the Gulf of California. – 1959.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Шишкова П.О., Медведев И.П.

Институт океанологии П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: короткопериодные колебания, Балтийское море, сгонно-нагонные явления

Балтийское море является полузамкнутым водоемом. Колебания уровня Балтийского моря в различных диапазонах периодов достаточно хорошо изучены. Величина приливных колебаний уровня в море не превышает 20 см. Изменения ветра над акваторией моря вызывают сильные сгонно-нагонные колебания уровня внутри бассейна. В вершине Финского залива высота штормовых нагонов достигает более 3-4 м [1]. Если нагоны и приливы в Балтийском море хорошо изучены, то особенности короткопериодных колебаний уровня (с периодами меньше 6 ч) в акватории Балтийского моря - открытый вопрос, требующий дополнительных исследований. Короткопериодные колебания уровня в Балтике различаются в зависимости от морфологии заливов, бухт и каналов. Колебания с периодами менее 6 часов в данном регионе остаются гораздо менее изученными в силу необходимости анализа длинных временных рядов с высоким временным разрешением (1-10 мин).

В работе были проанализированы данные о состоянии уровня моря с 25 станций шведской системы сбора морской информации SMHI, покрывающих целиком восточное побережье Швеции. Также были использованы данные с 14 датчиков Финского Метеорологического Института, покрывающих финское побережье Балтики. Временное разрешение варьировалось от одной до пяти минут в зависимости от конкретной станции, а длина рядов - от одного до пяти лет. Ряды из обеих систем были очищены от очевидных выбросов и невязок, приливной компонентой решено было пренебречь в силу малых высот приливов в регионе. Акватория была разделена на кластеры по расположению. Далее за каждый день были выбраны максимальные значения уровня, после чего дни с аномально высоким или низким уровнем относительно соседних дней были рассмотрены отдельно, а также сравнивались с другими точками кластера. Были выбраны несколько дней, в которые уровень был аномальным для более чем половины станций внутри кластера.

Основной целью работы является установление природы аномальных короткопериодных колебаний уровня. В работе использованы данные о скорости и направлении ветра на высоте 10м, а также о приземном давлении, взятые из системы реанализа ERA5. Сопоставление карт погоды за несколько дней до и во время изучаемых явлений с динамикой состояния уровня поверхности позволили ответить на вопрос о метеорологическом происхождении колебаний.

Также были проведены спектральный и wavelet-анализ с целью обнаружения собственных колебаний внутри изучаемых акваторий и возможного резонанса этих колебаний с теми, что были вызваны метеорологическими причинами и определены как аномальные.

Было установлено, что чаще всего аномальные колебания вызваны проходящими циклонами. В вершине Ботнического залива амплитуды подобных колебания усиливались вследствие формы акватории, такое же усиление наблюдалось и в точках, расположенных в локальных заливах. Одна из изученных аномалий может быть также классифицирована как метеоцунами.

Были сделаны выводы о повторяемости аномальных короткопериодных колебаний на протяжении нескольких лет, а также об их сезонной повторяемости. Полученные выводы были также сравнены с результатами работы [2], где изучались экстремальные короткопериодные колебания у берегов Финляндии.

Профинансировано лабораторией цунами им. Соловьева ИО РАН

Список литературы

- 1) Медведев И.П., Рабинович А.Б., Куликов Е.А. Приливные колебания в Балтийском море // Океанология. 2013. Т. 53. № 5. С. 596–611.
- 2) Pellikka H., Sepi´c J., Lehtonen I., Vilibi´c I. Meteotsunamis in the northern Baltic Sea and their relation to synoptic patterns // Weather and Climate Extremes. 2022.

ТРАНСМИССИВНАЯ НЕОПЛАЗИЯ МИДИЙ *MYTILUS TROSSULUS* В ТАУЙСКОЙ ГУБЕ ОХОТСКОГО МОРЯ: ДИАГНОСТИКА И РАЗНООБРАЗИЕ

Александрова П.Н.¹, Майорова М.А.², Хайтов В.М.¹, Стрелков П.П.¹, Сказина М.А.¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: двустворчатые моллюски, *Mytilus*, трансмиссивный рак.

Трансмиссивный рак – заразное онкологическое заболевание, при котором инфекционными агентами являются сами раковые клетки, некогда возникшие у особи – “нулевого пациента”. Это редкое заболевание, отмеченное у домашних собак, тасманийского дьявола и нескольких видов *Bivalvia* [2]. У двустворчатых моллюсков это заболевание носит название трансмиссивная неоплазия, или BTN. Феноменологически BTN – это диссеминированная неоплазия (DN), лейкемия-подобное заболевание, поражающее гемолимфу. В норме у моллюсков выделяют два основных типа гемоцитов – это гранулоциты и агранулоциты. При DN в гемолимфе появляются неопластические клетки округлой формы с крупным ядром. С развитием заболевания неопластические клетки проникают в ткани и органы моллюска. Этиологически DN может быть как спонтанной, так и обусловленной BTN. У моллюсков с BTN наблюдается генетический химеризм – неопластические гемоциты имеют генотип, родственный генотипу “нулевого пациента” и отличный от генотипа мидии-хозяина. У мидий *Mytilus trossulus* известны 2 генетические линии BTN, MtrBTN1 и MtrBTN2; в пределах второй также выделяют 2 “штамма” – MtrBTN2.1 и MtrBTN2.2, маркированные специфичными аллелями по мтДНК [4].

Диагностика MtrBTN включает два основных этапа: подтверждение у мидий DN и затем генотипирование их тканей для выявления раковых аллелей. На первом этапе применяется метод проточной цитометрии гемолимфы (FC), окрашенной флюоресцентным красителем ДНК [1]. FC позволяет выявлять и количественно описывать фракции нормальных (диплоидных) и раковых (анеуплоидных) клеток. Больными считаются особи с долей анеуплоидных клеток более 10% [3]. На втором этапе используется COI-тест на гетероплазмия [3]. Тест заключается в генотипировании по COI-фрагменту мтДНК гемоцитов и тканей ноги моллюска и показывает наличие аллелей, уникальных для разных линий и штаммов MtrBTN.

Альтернативный метод диагностики DN – это изучение живых клеток гемолимфы под световым микроскопом. В отличие от большинства здоровых гемоцитов, распластывающихся на поверхности чашки Петри, неопластические клетки не распластываются по субстрату и имеют округлую форму [1].

Задачами нашего исследования было диагностировать DN и BTN у мидий, собранных в 2023 году в окрестностях г. Магадан, провести анализ разнообразия BTN и заболеваемости мидий DN и BTN, и оценить эффективность диагностики DN при помощи световой микроскопии в сравнении с FC, рассматриваемой в качестве “золотого стандарта”.

Были исследованы 1803 мидии *M. trossulus* из 15 поселений Тауйской губы Охотского моря. У каждой особи были взяты образцы гемолимфы и мышечных тканей ноги. Для сравнения методов диагностики DN аликвоту свежей гемолимфы изучали под микроскопом, а остальная гемолимфа фиксировалась в 70% этаноле для FC и генотипирования. Капли гемолимфы помещались в чашку Петри, спустя 10-15 минут клетки оседали на ее поверхности и были различимы в световой инвертированный микроскоп при увеличении в 320 раз. По наличию в гемолимфе неопластических клеток особи были предварительно разделены на 2 группы – здоровые и больные DN. Больные особи также были классифицированы по доле неопластических клеток на четыре категории: (1)

единичные округлые клетки, до 3-5 в поле зрения микроскопа; (2) 10-20 округлых клеток; (3) значительное количество округлых клеток, но преобладают здоровые; (4) единичные здоровые клетки среди округлых. Затем все мидии были изучены с помощью ФС. Для особей с DN по результатам ФС проводили СОI-тест. Были оценены чувствительность и точность диагностики DN при помощи световой микроскопии в сравнении с результатами ФС. Чувствительность (доля больных особей, верно определенных тестом относительно истинно больных особей) отражает вероятность того, что больная особь будет классифицирована именно как больная, в то время как точность отражает долю релевантных результатов теста относительно всех изученных животных.

Среди изученных мидий заболеваемость DN по результатам световой микроскопии составила 10%, по результатам проточной цитометрии - 4.6%. Заболеваемость BTN составила 4.2%, были обнаружены все известные генотипы: MtrBTN1, MtrBTN2.1 и MtrBTN2.2. По результатам оценки эффективности диагностики DN при помощи световой микроскопии чувствительность метода составила 89%. Для моллюсков с разными линиями BTN, различий чувствительности метода не выявлено. При этом чем больше округлых клеток наблюдалось в образце, с тем большей вероятностью неоплазия подтверждалась результатами цитометрии: положительная прогностическая ценность теста для 1, 2, 3 и 4 категории составила 3%, 54%, 86% и 100%, соответственно.

Полученные данные о высокой чувствительности и точности метода позволяют использовать световую микроскопию для экспресс-диагностики DN у мидий на поздних стадиях болезни. У особей с небольшим количеством видимых в микроскоп округлых клеток зачастую неоплазия не подтверждалась при помощи ФС. Так или иначе световую микроскопию можно использовать для существенного сужения круга особей с подозрением на DN. Для окончательного суждения о болезни у этих особей желательно применять стандартные методы.

Авторы благодарят К.В. Регель, Ю.Т. Марченко, С.С. Малавенду, И.В. Кожина за помощи в сборе и обработке материала. Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (19-74-20024).

Список литературы

- 1) Одинцова Н.А. Лейкемия-подобный рак у двустворчатых моллюсков // Биология моря. 2020. Т. 46, № 2. С. 75–84.
- 2) Metzger M.J. et al. Widespread transmission of independent cancer lineages within multiple bivalve species // Nature. 2016. V. 534, № 7609. P. 705–709.
- 3) Skazina M. et al. Two lineages of bivalve transmissible neoplasia affect the blue mussel *Mytilus trossulus* Gould in the subarctic Sea of Okhotsk // Current Zoology. 2023. V. 69, № 1. P. 91–102.
- 4) Yonemitsu M.A. et al. A single clonal lineage of transmissible cancer identified in two marine mussel species in South America and Europe // Elife. 2019. V. 8. P. e47788.

АДАПТАЦИЯ ЗРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ, В ЧАСТНОСТИ, ТОПОГРАФИИ ГАНГЛИОЗНЫХ КЛЕТОК И ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ СЕТЧАТКИ К ОСОБЕННОСТЯМ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ У ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА AROGONIDAE: *RHABDAMIA GRACILIS*, *TAENIAMIA FUCATA*, *OSTORHINCHUS CYANOSOMA*, *SPHAERAMIA NEMATOPTERA*

Алескеров Н.Р.о., Пуцин И.И.

"Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского" Дальневосточного отделения Российской академии наук, Лаборатория физиологии, г. Владивосток

Ключевые слова: топография ганглиозных клеток, сенсорная нейробиология

Из всех сенсорных систем зрительная для костных рыб является наиболее значимой. Она играет ключевую роль во внутри- и межвидовой коммуникации и половом поведении, в адаптации к условиям среды, в реакциях защиты, поисках пищи. Зрительная система костных рыб имеет большое структурно-функциональное различие, которое связано с особенностями зрительной среды и зрительно-обусловленного поведения [1]. В частности, сетчатка глаза разных видов рыб отличается по топологии нейронов и ненейрональных элементов и пространственному распределению [2].

В сетчатке многих позвоночных существуют специализированные зрительные зоны (СЗЗ). В этих областях увеличена пространственная плотность ряда элементов сетчатки, в частности ганглиозных клеток (ГК) и фоторецепторов. Наличие и выраженность этих зон связаны с экологией и происхождением вида. Изучение особенностей структурно-функциональной организации зрительной системы, в частности топографии нейронов сетчатки, и её взаимосвязи с особенностями биологии конкретного вида представляет большой теоретический и прикладной интерес. Несмотря на большое число работ по топографии ГК и остроте зрения у костных рыб, многие группы остаются малоизученными в этом отношении.

Одной из недостаточно изученных групп является сем. Arogonidae. Представители данного семейства подвергаются давлению со стороны крупных хищников, поэтому эффективные защитные механизмы имеют решающее значение для их выживания [1]. Конкуренция за укрытия может определять разделение сред обитаний в этом семействе. Виды, обитающие на открытых пространствах, отличаются от видов, обитающих вблизи и на коралловых рифах, по способам защиты от хищников. Некоторые виды, обычно встречающиеся вдали от коралловых рифов, такие как: *R. gracilis*, *Z. viridiventer*, *T. fucata*, *T. zosterophora*, *Z. leptacantha*, имеют серебристо-прозрачный или бледный окрас, обеспечивающий хороший камуфляж на фоне голубой воды [3]. В отличие от них, виды, обитающие вблизи коралловых рифов, например, *O. doederleini*, *O. cookii*, *O. compressus*, или те, кто всегда скрыты внутри коралловых рифов, например, *N. savayensis*, *S. nematoptera*, имеют более темный окрас тела или темные горизонтальные полосы.

Эти и другие различия между двумя вышеупомянутыми группами привели к формированию различий в топографии нейрональных элементов, в частности ГК. Как было описано в работе Люэрманн с коллегами [4] у *Rhabdamia gracilis* и *Taeniamia fucata* были обнаружены СЗЗ в центральной и в темпо-ветральной части сетчатки, соответственно. Пространственная плотность (ПП) ГК в СЗЗ составила 8 289 кл/мм² у *T. fucata* и 23 051 кл/мм² у *R. gracilis* острота зрения составляла 7,3 и 7,1 циклов на градус, соответственно. А у *Ostorhinchus cyanosoma* была обнаружена слабо выраженная горизонтальная полоска с *area retinae centralis* в ее составе, пиковая плотность ганглиозных клеток составила 19 843 кл/мм², острота зрения составляла 8,5 цикл/градус [4]. А у *Sphaeramia nematoptera* наблюдается умеренно выраженная зрительная полоска (ЗП), расположенная под небольшим углом к экватору сетчатки. ПП ГК достигала максимума в области

оптического диска, и составило 11 766 кл/мм², максимальное пространственное разрешение составило 9.07 цикл/градус.

Топография ГК сетчатки коррелировала со способом питания изученных видов: планктофаги (*R. gracilis*, *T. fucata*) имели СЗЗ в центральной и темпоральной части сетчатки, в то время как бентосные и пелагические виды (*O. cyanosoma*), питающиеся ракообразными и мелкими беспозвоночными, имели зрительную полосу [4]. *S. nematoptera* — планкто- и бентофаги. Мы полагаем, что выраженная зрительная полоска с пиками ПП ГК в её центральной части позволяет эффективно обозревать горизонт и обеспечивает раннее обнаружение объектов в латеральной монокулярной зоне без демаскирующих движений глаз или головы, равно как и детекцию объектов в передней бинокулярной зоне зрительного поля. Это объясняет отсутствие выраженных специализированных зрительных зон концентрического типа (т. н. area) и вариабельность положения пиков ПП ГК в пределах ЗП. Схожую топографию ГК как у *S. nematoptera* имеет *O. cyanosoma* [4]. Предположительно это объясняется схожим образом жизни двух видов. Эти два вида населяют прибрежные лагуны и коралловые рифы; активен преимущественно ночью, питается зоопланктоном в близи дна.

В соответствии с теорией Хьюза [5], позвоночные, обитающие на открытых пространствах с выраженным горизонтом, обладают зрительной полоской, в то время как виды, предпочитающие закрытые пространства и более сложную зрительную среду, обычно имеют концентрические зрительные зоны. В то же время, строгие бентофаги или виды со смешанным спектром питания, включающим как планктон, так и бентос (к каковым относится апогон-бабочка) имеют более выраженные ЗП по сравнению с чистыми планктофагами [6]. Это может объяснять несоответствие СЗЗ *S. nematoptera* таковым, предполагаемым теорией Хьюза.

Работа выполнена в ЦКП «Приморский океанариум», ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток)

Список литературы

- 1) De Busserolles, F., Marshall N. J. Seeing in the deep-sea: visual adaptations in lanternfishes // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2017. V. 372, №. 1717. P. 20160070.
- 2) Collin, S. P., Shand J. Retinal sampling and the visual field in fishes // Sensory processing in aquatic environments. Springer, New York, NY, 2003. P. 139-169.
- 3) Marshall N.J., Cortesi F., de Busserolles F., Siebeck U.E., Cheney K.L. Colours and colour vision in reef fishes: Past, present, and future research directions // Journal of Fish Biology. 2019. V. 95. №. 1. P. 5–38.
- 4) Luehrmann, M. Microhabitat partitioning correlates with opsin gene expression in coral reef cardinalfishes (Apogonidae) / M. Luehrmann, F. Cortesi, K. L. Cheney, F. de Busserolles, N. J. Marshall // Functional Ecology. 2020. V. 34, №. 5. P. 1041–1052.
- 5) Crescitelli F. et al. The topography of vision in mammals of contrasting life style: comparative optics and retinal organisation. Springer Berlin Heidelberg, 1977. P. 613–756.
- 6) De Busserolles, F., Marshall N. J. Seeing in the deep-sea: visual adaptations in lanternfishes // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2017. V. 372, №. 1717. P. 20160070.

ИНДОЛ УКСУСНАЯ КИСЛОТА – МОДУЛЯТОР РОСТА НЕКОТОРЫХ ЗЕЛЕННЫХ И ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ

Лескова С.Е.¹, Барсова Е.А.², Михеев Е.В.¹, Ковалев Н.Н.^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО Дальрыбвтуз, г. Владивосток

² ДВФУ, г. Владивосток

Ключевые слова: микроводоросли, накопительная культура, индол уксусная кислота, фитогормон, *Tetraselmis suecica*, *Phaeodactylum tricornutum*, *Chaetoceros muelleri*, *Isochrysis galbana*.

Особое внимание, уделяемое микроводорослям в последние годы, в основном связано с высокой продуктивностью биомассы и составом метаболитов. [1] Интерес к технологии производства микроводорослей обусловлен возможностью получения концентратов и их использования в различных отраслях промышленности [2], таких как фармацевтическая, косметическая и пищевая.

На сегодняшний день аквакультура является одним из быстроразвивающихся сегментов пищевой промышленности. Важным аспектом применения микроводорослей в аквакультуре служит использование их биомассы в качестве корма.

Факторами, определяющими эффективность производства биомассы микроводорослей, являются условия культивирования – свет, температура, состав среды. Регуляторами роста и состава растений выступают фитогормоны.

Фитогормоны – это сигнальные молекулы, которые вызывают реакцию в растительном организме уже в следовых концентрациях. Фитогормоны играют регулируемую роль в физиологическом метаболизме клеток, включая стимулирование клеточного деления, повышение стрессоустойчивости и улучшение фотосинтетической эффективности и, таким образом, повышают рост биомассы, липидов, хлорофилла и белка.

Наиболее распространенным и наиболее изученным фитогормоном ауксинового ряда является индол-3-уксусная кислота (ИУК) [3].

В литературе имеются сведения о том, что добавление фитогормонов, в частности ауксинов, к культурам микроводорослей может увеличить продуктивность биомассы, а также количество клеток и содержание метаболитов в биомассе микроводорослей [4].

Несмотря на то, что основные классы фитогормонов выявлены у исследованных видов микроводорослей, остаются малоизученными вопросы об их физиологической роли, а также влиянии экзогенных регуляторов роста на культуры микроводорослей.

Проведена оценка влияния индол уксусной кислоты (ИУК) в концентрациях $0,1-1,0 \times 10^{-5}$ М на ростовые показатели *Tetraselmis suecica* ((Kylin) Butcher, 1959), *Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin, 1897), *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898) и *Isochrysis galbana* (Parke, 1949).

Оценку действия фитогормона осуществляли по показателям: удельная скорость роста (R), количество делений в день (K), время удвоения популяции (T_2) и процент увеличения плотности культуры.

В течение 14-дневного культивирования *T. suecica* установлена эффективная стимулирующая концентрация ИУК ($0,6 \times 10^{-5}$ М) по оценке удельной скорости роста и количества делений клеток микроводоросли в день. При данной концентрации фитогормона время удвоения популяции сокращается практически на 1 сутки, а прирост плотности культуры превышает таковой в контрольной группе на 85,3%. Другие исследованные концентрации фитогормона ингибировали рост культуры.

Эффективная стимулирующая концентрация ИУК для диатомовых водорослей составила $0,2 \times 10^{-5}$ М. При этом удельная скорость роста культуры *Ch. muelleri* была в 1,3 раза выше таковой для *Ph. tricornutum*. Время удвоения популяции под действием ИУК сокращалось на 0,57 и 0,4 суток

для *Ch. muelleri* и *Ph. tricornutum*, соответственно. Однако следует отметить, что увеличение плотности культуры *Ph. tricornutum*, по сравнению с контролем, было выше (111,4%), чем для культуры *Ch. muelleri* (58,8%).

Следует отметить, что концентрации ИУК более $0,2 \times 10^{-5}$ М практически не оказывали влияния на ростовые параметры исследованных диатомовых водорослей.

Самая низкая эффективная концентрация ИУК - $0,2 \times 10^{-5}$ М, определена для культуры *I. galbana*. На фоне незначительного увеличения скорости роста фитогормон стимулировал увеличение плотности культуры на 110% больше, чем при культивировании без гормона. Следует отметить, что более высокие концентрации фитогормона ингибировали рост культуры *I. galbana*.

Проведенным исследованием установлено, что ИУК в низких концентрациях оказывает стимулирующий эффект на увеличение плотности культур микроводорослей. Выявлена специфичность действия фитогормона и его эффективные концентрации. Определено, что эффект роста диатомовых микроводорослей под действием ИУК в большей степени определяется увеличением удельной скорости роста и уменьшением времени удвоения популяции. В то же время ИУК не оказывала влияния на время удвоения популяции *T. suecica* и *I. galbana*.

Применение фитогормонов как регуляторов продуктивности биомассы у штаммов микроводорослей с высоким содержанием липидов и жирных кислот открывает новые перспективы их практического использования. Полученные данные о стимулирующем и ингибирующем влиянии гормонов на ростовые процессы микроводорослей открывают перспективу их использования при разработке биотехнологических подходов в аквакультуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке ДВФУ (Программа стратегического академического лидерства «Приоритет-2030»: Мировой океан, по инициативной тематике № 23-05-1.06-0016 по теме «Разработка способа получения концентратов микроводорослей в качестве корма для объектов аквакультуры» в рамках реализации проекта «Технологии контроля состояния здоровья и улучшения показателей роста объектов аквакультуры»).

Список литературы

- 1) Rawat I., Ranjith Kumar R., Mutanda T., Bux F. Biodiesel from microalgae: a critical evaluation from laboratory to large scale production // Appl. Energy. 2013. No 103. P. 444-467.
- 2) Шинкарев С. М., Самуйленко А. Я., Гринь С. А., Неминущая Л. А., Скотникова Т. А., Павленко И. В., Канарский А. В. Перспектива развития технологии производства микроводорослей // Вестник технологического университета Т. 20. № 14. 2017. С. 146-149.
- 3) Lu Y., Xu J. Phytohormones in microalgae: a new opportunity for microalgal biotechnology? // Trends in Plant Sci. 2015. Vol. 20. No 5. P. 273-82.
- 4) Magierek E., Krzemińska I., Tys J. Stimulatory effect of indole-3-acetic acid and continuous illumination on the growth of *Parachlorella kessleri* // Int. Agrophys. 2017. Vol. 31. P.483-489.

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ БЕЛКОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ОПСИНОВ *PLEUROBRACHIA*, ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ УЧАСТИЯ В ПРОЦЕССАХ ФОТОРЕЦЕПЦИИ

Баяндина Ю.С., Кулешова О.Н.

ФИЦ "Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: гребневика, *Pleurobrachia*, фоторецепция, опсины, геном, транскриптом.

Гребневика считаются одной из первых отделившихся ветвей эволюционного древа многоклеточных животных. Гребневика обладают достаточно сложной нервно-мышечной организацией, которая, в значительной степени, основана на уникальных молекулярных решениях, развивавшихся в ходе эволюции параллельно и независимо относительно других Metazoa [1, 2]. Из базальных Metazoa, помимо Cnidaria, функциональные опсины обнаружены только у гребневиков. Опсины – белки отвечающие за световосприятие у большинства многоклеточных животных [3].

Морфологические данные говорят о том, что большинство представителей гребневиков должны обладать способностью к световосприятию: их аборальный орган является примитивным мозгом, он контролирует положение тела в пространстве, движение и возможно содержит светочувствительные участки. [4, 5].

В Чёрном море обитают три вида гребневиков, относящихся к разным отрядам: традиционный вид – цидишпидный гребневик *Pleurobrachia pileus*, а также гребневика вселенцы *Mnemiopsis leidyi* (отряд Lobata) и *Beroe ovata* (отряд Beroidae). Отличается не только таксономия и биология этих видов, но и экология, так *M. leidyi* и *B. ovata* обитают в толще воды в приповерхностном сильно освещенном теплом слое воды над глубинами 5–20 м, в то время как *P. pileus* обнаруживают на глубинах 50 м (слабо-освещенных слоях) в более холодных водах.

Ранее, в лабораторных экспериментах, мы обнаружили наличие явных поведенческих реакций *M. leidyi* и *B. ovata* на облучение аборального органа высокоинтенсивным световым излучением [6]. Также нами был проведен анализ полногеномных и транскриптомных данных, имеющихся в международных базах, который показал, что у гребневиков *Mnemiopsis* (Lobata) и *Beroe* (Beroidae) присутствует три типа опсинов (Stenophora 1–3). В геномах и транскриптомах Beroidae нами обнаружены три гена, кодирующих белки опсинов, гомологичных опсином Lobate (*M. leidyi*), а положение консервативных аминокислот в белковых последовательностях Beropsin 1 и 2 свидетельствуют о том, что они являются визуальными опсинами [данные находятся в печати]. Таким образом, мы можем утверждать, что *M. leidyi* и *B. ovata* способны к направленной фоторецепции. Однако, изучение наличия поведенческих реакций на изменение освещенности мелких гребневиков (длина тела до 2 см) *P. pileus* с четко выраженными паттернами поведения было затруднено. Но возможна ли вообще фоторецепция: присутствуют ли функциональные опсины у гребневиков рода *Pleurobrachia*?

С целью идентификации генов опсинов у гребневиков рода *Pleurobrachia* нами проведен анализ транскриптомных данных, которые получены нами для образца из Чёрного моря *P. pileus* (SRR26700624) /Russia: Sevastopol, а также из базы данных NCBI *Pleurobrachia* в базе NCBI: *P. pileus* (SRR6074514), *Pleurobrachia* sp. A LM-2017 (SRR6074519), *Pleurobrachia* sp. B LM-2017 (SRR6074520), *Pleurobrachia* sp. C LM-2017 (SRR6074517), *Pleurobrachia* sp. UF-2017 (SRR5892573). Предподготовка данных, de novo сборка транскриптомов, предсказание аминокислотных последовательностей, автоматическая аннотация проведены с использованием программ: fastP v0.23.2, Trinity v2.13.2, TransDecoder v5.5.0, BLAST v.2.12.0, HMMER 3.2.1. Для аннотации использованы базы данных SwisProt (17.11.2021) и Pfam-A (15.11.2021), а также база данных Opsin, сформированная на основе SwisProt и TrEMBL.

В результате определены гомологичные семейству опсинов Ctenophora 1–3 аминокислотные последовательности. Последовательности Opsin1 *P. pileus* Black Sea, *P. pileus*, *Pleurobrachia* sp. С LM-2017 и *Pleurobrachia* sp. С LM-2017 идентичны Opsin1 *P. bachei* (AGE89244.1) на 89–97%, и *M. leidy* (AFK83788.1) на 67–78%; Opsin2 *P. pileus* Black Sea и *Pleurobrachia* sp. В LM-2017 идентичны Opsin2 *P. bachei* (AGE89245.1) на 64–83%, и *M. leidy* (AFK83789.1) на 53–59%; Opsin3 *P. pileus* Black Sea и *Pleurobrachia* sp. В LM-2017 идентичны Opsin3 *M. leidy* (AFK83790.1) на 22–24%. В транскриптомах *Pleurobrachia* sp. А LM-2017 и *Pleurobrachia* sp. В LM-2017 последовательностей гомологичных семейству опсинов Ctenophora 1–3 найдено не было, что может быть связано как с сравнительно меньшей глубиной секвенирования, так и, возможно, низкой экспрессией белок кодирующих транскриптов. Аминокислотные последовательности *P. pileus* Black Sea Opsin1–3 и *Pleurobrachia* sp. UF-2017 Opsin 3 представляют собой полноразмерные белки (~345–425aa). Все остальные найденные последовательности опсинов представляют собой отдельные части белков (~100–250aa).

Проведённый анализ полных последовательностей показал, что у найденных Opsin1–2, присутствуют ключевые функциональные остатки и домены, необходимые для связывания с ретиналем и стабилизации конформационных изменений во время световой активации, и они полностью аналогичны *P. bachei* Opsin1–2. А для Opsin3 выявлены частичные аналоги с Opsin3 *M. leidy*.

Таким образом можно утверждать, что Opsin1–2 у гребневиков рода *Pleurobrachia*, потенциально могут участвовать в процессах фоторецепции. В то время, как Opsin3, по всей видимости, не является визуальным опсином.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1023032000049-6-1.6.21

Список литературы

- 1) Moroz L.L. et al. The ctenophore genome and the evolutionary origins of neural systems // Nature. 2014. V. 510. № 7503. P. 109–114.
- 2) Burkhardt P. et al. Syncytial nerve net in a ctenophore adds insights on the evolution of nervous systems // Science. 2023. V. 380. № 6642. P. 293–297.
- 3) Fleming J.F. et al. A novel approach to investigate the effect of tree reconstruction artifacts in single-gene analysis clarifies opsin evolution in nonbilaterian metazoans // Genome biology and evolution. 2020. V. 12. № 2. P. 3906–3916.
- 4) Aronova M.Z., Kharkeevich T.A. Secondary Messengers in the Locomotor-Sensory System of Early Multicellulars. Inositol-Containing Compartments in Receptor Cells of Ctenophores and Coelenterates according to the Data of Cytochemical Investigation // Journal of Evolutionary Biochemistry and Physiology. 2001. V. 37. P. 417–426.
- 5) Tamm S.L. Novel structures associated with presumed photoreceptors in the aboral sense organ of ctenophores // The Biological Bulletin. 2016. V. 231. № 2. P. 97–102.
- 6) Baiandina Iu.S., Kirin M.P., Krivenko O.V. Black Sea Mnemiopsis leidy (Ctenophora) adult locomotion and light-induced behavior in laboratory experiments // Journal of Sea Research. 2022. V. 180. P. 102–152.

ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ЦЕРКАРИЙ ТРЕМАТОД СЕМЕЙСТВА OPESCOELIDAE У БРЮХОНОГИХ МОЛЛЮСКОВ *HYDROBIA ACUTA* В ЧЕРНОМ МОРЕ

Белоусова Ю. В.

ФГБУН ФИЦ "Институт биологии южных морей им. А.О.Ковалевского РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: трематоды, партениты, Opescoelidae, моллюски, *Hydrobia acuta*, Черное море

Трематоды семейства Opescoelidae широко распространены в водных экосистемах, при этом видовой статус большинства партенит этого семейства остается неразрешенным. Семейство Opescoelidae включает 172 рода, представители 6 из которых встречаются в Черном море. У черноморских рыб из разных семейств зарегистрировано 9 видов опецилидных трематод, однако в настоящее время детально описаны мариты только 3 видов: *Helicometra fasciata* (Rudolphi, 1819), *Cainocreadium flesi* Korniychuk, Gaevskaya, 2000 и *Gaevskajatrema perezi* (Mathias, 1926).

Церкарии 73 вида опецилидных трематод известны у 39 видов моллюсков, из них в Черном море зарегистрированы только 3 вида: *Cercaria gibbulae* у моллюска *Steromphala albida*, *C. caradagi* у *S. divaricata*, а также экспериментальным путем было доказано, что у *S. adriatica* паразитируют церкарии *Helicometra fasciata*.

В результате изучения фауны трематод у моллюсков *Hydrobia acuta* в акватории орнитологического заповедника «Лебяжий острова» (Чёрное море, Каркинитский залив) найдены спороцисты трематод, содержащие микроцеркных церкарий. По морфологическим признакам, а именно наличию короткого хвоста в виде присоски, они были определены как трематоды семейства Opescoelidae.

Обнаруженные церкарии существенно отличаются от 70 валидных видов этого семейства, для которых описаны церкарии, при этом имеют наибольшее сходство с *C. ruvida* по наличию хвоста-присоски, а также форме стилета с одним острием с двумя выступами и количеству стилетных желез – 18. Следует отметить, что церкарии *C. ruvida* в Средиземном море проявляют строгую специфичность к моллюску *Jujubinus* (= *Calliostoma*) *striatus*, в Черном море не обитающему.

Полученные данные по особенностям морфологии церкарий от моллюска *Hydrobia acuta* в Черном море, а также новый для этих трематод вид хозяина, позволяют предположить, что обнаруженные нами церкарии относятся к виду опецилидных трематод, для которого церкарии ранее описаны не были. Дальнейшие молекулярно-генетические исследования этих церкарий позволят установить их видовой статус.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме "Биоразнообразие как основа устойчивого функционирования морских экосистем, критерии и научные принципы его сохранения» (№ гос. регистрации FNNZ-2024-0027).

**ОЦЕНКА РЕАКЦИИ КЛЕТОЧНОГО ИММУНИТЕТА ГЕМОЦИТОВ
СРЕДИЗЕМНОМОРСКОЙ МИДИИ *MYTILUS GALLOPROVINCIALIS* НА
ИНВАЗИЮ ЗЕЛЕННОЙ МИКРОВОДОРОСЛИ *COCCOMYXA PARASITICA* (В
УСЛОВИЯХ *IN VITRO*)**

Богачева Е.А., Кладченко Е.С., Кухарева Т.А., Андреева А.Ю., Челебиева Э.С.

ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: зеленые микроводоросли, *Coccomyxa*, моллюски, гемоциты, фагоцитоз.

Культивирование двустворчатых моллюсков является одной из активно развивающихся отраслей пищевой промышленности, на долю которой приходится более 20% мировой аквакультуры [1]. Одной из ключевых проблем марикультурных хозяйств является высокий уровень гибели моллюсков, вызванный вспышками инфекционных заболеваний, однако, работающих инструментов для их профилактики и лечения крайне мало [2]. В морских экосистемах, включая культивирование в открытом море, двустворчатые моллюски зачастую подвергаются воздействию патогенных микроорганизмов, определяющих в дальнейшем их рост, размножение и общее состояние здоровья. Среди новых проблем для марикультуры большую угрозу для двустворчатых моллюсков приобретают недавно обнаруженные у ряда представителей инвазии зеленых паразитических микроводорослей рода *Coccomyxa*. Установлено, что распространение клеток микроводоросли по организму моллюска индуцирует эрозию раковин и воспалительные процессы в мягких тканях, снижает фильтрационную и репродуктивную способности инфицированных моллюсков. Большинство работ включает в себя описание новых случаев заражения моллюсков *Coccomyxa* в разных регионах Мирового океана, но, при этом, крайне ограничены данные об особенностях взаимодействия “патоген (паразитическая микроводоросль) - моллюск (хозяин)” и факторы патогенности *C. parasitica*, определяющие как характер иммунного ответа хозяина на паразитарную инвазию, так и вероятность ее распространения среди культивируемых видов. В данной работе в краткосрочных *in vitro* экспериментах исследованы особенности реакции клеточного иммунитета гемоцитов средиземноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 (способность к фагоцитозу патогенного микроорганизма, уровень индуцированной продукции активных форм кислорода (АФК) гемоцитами, величина мембранного потенциала митохондрий) в ответ на инвазию клеток потенциально патогенной зеленой паразитической микроводоросли *Coccomyxa parasitica* R.N.Stevenson & G.R.South, 1974.

В работе использовались средиземноморские мидии *M. galloprovincialis* (вес $12,0 \pm 2,5$ г, размер $55,3 \pm 1,3$ мм, $n=25$), полученные с марикультурного хозяйства, расположенного в Севастопольской бухте (г. Севастополь, 44.6160070, 33.5024918) и штамм паразитической зеленой микроводоросли *C. parasitica*, изолированный из тканей инфицированных моллюсков в Японском море (г. Владивосток, $39^{\circ}34'55''$ с. ш. $134^{\circ}34'11''$ в. д.) и адаптированный к солености 18‰ в лабораторных условиях. Гемолимфу отбирали из переднего мускула-замыкателя мидий и трижды отмывали в стерильной морской воде (5 мин, 500г). После финальной отмывки гемоциты ($2-4 \cdot 10^6$ кл мл⁻¹) инкубировали с клетками *C. parasitica* в течение 1, 2 и 3 часов в соотношении 2:1. По окончании времени инкубации анализировали внутриклеточный уровень продукции АФК гемоцитов на основании интенсивности окрашивания клеток красителем диацетат 2'-7'-дихлорофлуоресцеина (DCF-DA, 10 мкл л⁻¹) и величину мембранного потенциала митохондрий на основании уровня флуоресценции гемоцитов, окрашенных флуоресцентным зондом Родамин 123 (Rh123, 10 мкл л⁻¹). Все измерения проводились на проточном цитометре MACSQuant Analyzer 10 (Miltenyi Biotec, Германия). Кроме того, с использованием световой и флуоресцентной микроскопии (Olympus CX 43, Япония) в условиях *in vitro* оценивали способность гемоцитов к фагоцитозу клеток паразитической микроводоросли при

инкубации во влажной камере в течение 1, 2, 3 часов. На микроскопических препаратах подсчитывали процент фагоцитирующих гемоцитов и среднее количество поглощенных клеток *C. parasitica* для определения фагоцитарной активности и фагоцитарного индекса (не менее 1000 гемоцитов на группу).

Показано, что уже после 1 часа инкубации гемоцитов мидий *M. galloprovincialis* с клетками паразитической микроводоросли *C. parasitica* уровень индуцированной продукции АФК снизился на 30% ($p < 0,01$) с $65,6 \pm 5,3$ по $46,5 \pm 5,7$ (у.е.), соответственно. С увеличением времени инкубации до 2 и 3 часов, соответственно, генерация гемоцитами АФК достоверно не различалась в сравнении с 1 часом, что косвенно может свидетельствовать о некоем ингибировании защитных механизмов иммунной системы для нейтрализации потенциального патогена во время фагоцитоза.

Кроме того, при инкубации гемоцитов средиземноморских мидий *M. galloprovincialis* с клетками паразитической микроводоросли *C. parasitica* зафиксировано достоверное увеличение флуоресценции красителя Rh123, отражающего мембранный потенциал митохондрий, почти в 2 раза ($p < 0,01$) на протяжении всего периода наблюдений с $10,8 \pm 1,1$ по $16,8 \pm 1,4 - 19,8 \pm 1,5$ (у.е.), соответственно. Такие значительные изменения мембранного потенциала могут указывать на увеличение функциональной активности митохондрий.

Было показано, что гемоциты средиземноморских мидий *M. galloprovincialis* поглощали клетки паразитической микроводоросли *C. parasitica*. При этом увеличение времени инкубации не оказало достоверного влияния на фагоцитарную активность гемоцитов по отношению к клеткам потенциально патогенного микроорганизма, но отразилось на фагоцитарном индексе и фагоцитарной активности гемоцитов: максимальное количество поглощенных гемоцитами клеток микроводоросли на один гемоцит было зафиксировано в течение 1-го и к 3-го часа инкубации, и соответственно составило $1,9 \pm 0,2$ и $1,6 \pm 0,1$ (у.е.) при $p < 0,01$. Процент гемоцитов, поглотивших клетки *C. parasitica* также составил $18,7 \pm 5,3 - 26,8 \pm 6,7$ % в течение каждого временного интервала инкубации.

Таким образом, краткосрочная инкубация гемоцитов мидии *M. galloprovincialis* и паразитической зеленой микроводоросли *C. parasitica* позволила зафиксировать фагоцитарную активность гемоцитов в отношении клеток микроводоросли, при этом уровень продукции АФК и величина мембранного потенциала митохондрий могут указывать на подавление защитных функций и функциональной активности гемоцитов при взаимодействии с патогеном.

Авторы выражают признательность к.б.н. Сокольниковой Юлии Николаевне, к.б.н. Ващенко Марине Александровне и к.б.н. Пономаревой Анне Андреевне за всестороннюю помощь и поддержку при изоляции штамма *C. parasitica*.

Адаптация водоросли к солености 18‰ выполнена в рамках гранта РФФИ №24-26-20096, исследование функционального ответа гемоцитов в рамках Госзадания № 121102500161-4.

Список литературы

- 1) FAO, F. Food and agriculture organization of the United Nations. Rome, 2021. URL: <http://faostat.fao.org>.
- 2) Brian, J.I., Ollard, I.S., Aldridge, D.C. Don't move a mussel? Parasite and disease risk in conservation action // Conservation Letters, 14(4). 2021

АКТИВНОСТЬ СУКЦИНАТДЕГИДРОГЕНАЗЫ И СОСТОЯНИЕ АДЕНИЛАТНОЙ СИСТЕМЫ ТКАНЕЙ *ANADARA KAGOSHIMENSIS* (ТОКУНАГА, 1906) В УСЛОВИЯХ ОСТРОЙ ГИПОКСИИ И СЕРОВОДОРОДНОЙ НАГРУЗКИ

Богданович Ю.В., Шалагина Н.Е., Кохан А.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О.Ковалевского РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: гипоксия, сероводородное заражение, моллюски, сукцинатдегидрогеназа, аденилатная система.

В настоящей работе исследуется активность сукцинатдегидрогеназы, как ключевого фермента цикла трикарбоновых кислот, анализируется состояние аденилатного комплекса в условиях сероводородного заражения и сопутствующей ей острой гипоксии, как вариант оценки способности организма *Anadara kagoshimensis* (Tokunaga, 1906) адаптироваться к экстремальным условиям выживания.

Контрольная группа моллюсков содержалась при 7,0-8,2 мгО₂/л (группа 1). Содержание кислорода понижали путем барботажа воды азотом в течение 2-х часов. Финальная концентрация кислорода в опытной группе составляла 0,1 мгО₂/л (группа 2). Сероводородное заражение создавали путем добавления в емкость с моллюсками Na₂S (ООО «Компонент - Реактив», Россия) до финальной концентрации 6 мг S₂⁻/л. Содержание кислорода в воде предварительно понижали до следовых количеств (группа 3). Экспозиция в обоих случаях составляла 48 часов. Температура воды в опытной и контрольной группах поддерживалась на уровне 17-20°C. Присутствие в воде сульфид-иона приводило к ее защелачиванию, которое компенсировали внесением 0.1н HCl. Значения pH удерживали на уровне 8.2–8.3. Содержание кислорода в воде контролировали при помощи оксиметра DO Meter ST300D RU Ohaus (США). Значения pH измеряли на pH-метре InoLab pH 720 (Германия). Концентрацию сульфид-иона в воде определяли потенциометрически с применением сульфидселективного сенсора MSBS (Нидерланды).

Препарирование и подготовку тканей (нога, жабры, гепатопанкреас) к хранению осуществляли с использованием ледяной бани при температуре 0-4°C. Образцы до определения активности ферментов хранили при температуре -80°C в морозильной камере Farma 900 Series Termo Scientific (США). Приготовление гомогенатов осуществляли непосредственно в день эксперимента. Для получения супернатанта гомогенаты центрифугировали при 6000 об мин¹ в течение 15 минут. В работе использовали рефрижераторную центрифугу К-23D (Германия). Все операции с материалом осуществляли на холоде при 0-4°C.

Активность сукцинатдегидрогеназы (СДГ, 1.3.99.1) определяли при длине волны 420 нм по скорости восстановления феррицианида калия [1]. В качестве трансформирующей среды использовали 0.1 М калий – фосфатный буфер. Активность выражали в нмоль сукцината мин⁻¹ мг⁻¹ белка. Содержание белка в пробах контролировали микробиуретовым методом [2]. Уровень адениловых нуклеотидов в тканях анадары регистрировали хемилюминесцентным методом [3]. Результаты выражали в мкмоль г⁻¹ ткани. В работе использовали двухлучевой спектрофотометр SPECS SSP-715 (Россия).

В условиях острой гипоксии (группа 2) отмечали рост активности СДГ относительно контрольной группы (группа 1) во всех без исключения тканях в 1,5-2,0 раза. В отношении ноги моллюска различия были статистически выражены (p<0,05; критерий Манна-Уитни). Сочетание острых форм гипоксии и сероводородной нагрузки (группа 3) не сопровождалось изменением активности СДГ. Полученные значения были близки к контрольным величинам. Причину роста

активности СДГ в условиях острой гипоксии, по - видимому, следует искать в повышении степени восстановленности пиридиннуклеотидов, железосерного комплекса и коэнзима Q (комплекс I), с которым сопряжен комплекс II дыхательной цепи митохондрий. СДГ является ключевым элементом последнего. Высокий редокс статус пиридиновых нуклеотидов при гипоксии снижает уровень оксалоацетата, который является конкурентным ингибитором СДГ, что способствует росту активности фермента. Участие СДГ в перераспределении гликолитических метаболитов в направлении образования сукцината в условиях анаэробноза позволяет митохондриям сохранять функциональную активность в условиях острой нехватки кислорода. Анализ состояния аденилатной системы показал снижение фракции АТФ во всех тканях. При этом минимальные значения были зарегистрированы для группы 3. Величина снижения составила 34-52 % ($p < 0,05$). В условиях сероводородной нагрузки отмечали также понижение уровня АДФ в тканях, что допускает реализацию аденилаткиназной реакции. Фракция АМФ для обеих экспериментальных групп, напротив, повышалась на 30-40 % ($p < 0,05$). Общий пул аденилатов при этом не претерпевал статистически значимых изменений (группа 2 и 3) и сохранялся на уровне контрольных значений (группа 1), что допускает сохранение функциональной нормы для данного вида моллюска в условиях измененной среды.

Из представленных результатов следует, что условия острой гипоксии в сочетании с сероводородной нагрузкой не являются экстремальными для организма анадары. Она сохраняет активность дыхательной цепи митохондрий и пул аденилатов в тканях на относительно высоком уровне при некотором понижении энергетического статуса (фракция АТФ).

Работа выполнена в рамках госзадания № 1023032700557-9-1.6.16;1.6.19.

Список литературы

- 1) Ещенко Н.Д., Вольский Г.Г., Прохорова М.И. // Методы биохимических исследований. 1982. С. 210–212.
- 2) Itzhaki R. F., Gill D. M. A micro-biuret method for estimating proteins // Analytical Biochemistry. 1964. V. 9. iss. 4. P. 401–410.
- 3) Holm-Hansen O., Booth C. R. The measurement of adenosine triphosphate in the Ocean and its ecological significance // Limnology and Oceanography. 1966. V. 11. iss. 4. P. 510–519.

ИСТОРИЯ ПРОМЫСЛА МОРСКИХ ГРЕБЕШКОВ У СЕВЕРНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Ботнев Д.А.

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

Ключевые слова: морские гребешки, Онекотан, промысел, Курильские острова

Развитие северных Курильских островов непосредственно связано с рыболовством. Промысел морских гребешков у северных Курильских островов был начат японскими рыбаками в тридцатые годы 20 века [1]. Отечественный промысел морских гребешков в районе Северных Курильских островов был начат Сахалинрыбпромом только в 70-х годах. В 1972 г. при поисковом промысле донных рыб в районе о. Онекотан были отмечены значительные уловы морского гребешка, доходивших до 5 тонн за траление. В этот же год к о. Онекотан было отправлено судно СРТМ «Пограничник Коржуков» для проведения работ по поиску скоплений морских гребешков. По результатам рейса дано заключение о наличии промысловых скоплений гребешка с охотоморской стороны острова на относительно небольшом участке, где в конце 1972 г. и первой половине 1973 г. тремя судами было выловлено 450 тонн гребешка.

Летом 1973 г. на судне ТУРНИФ РС «Онда» группой научных сотрудников Сахалинского отделения ТИНРО выполнены работы по обследованию скоплений морских гребешков на более обширной акватории, включая тихоокеанский шельф о. Онекотан. Были обнаружены скопления на охотоморском шельфе острова от рейда Шестакова до м. Кимберлей на глубинах 60-140 м, на океанском шельфе в районе бухты Блакостон на глубинах 100 – 208 м. Итоги рейса показали, что у о. Онекотан может проводиться специализированный промысел морских гребешков.

До 1975 г. интенсивность добычи морских гребешков была сравнительно низкой, промысел велся как у о. Онекотан, так и в бухте Майора в южной части о. Парамушир, где также были обнаружены небольшие скопления морских гребешков. Вылов постепенно возрастал, пока не стабилизировался на уровне 1,5–3,0 тыс. т. В настоящее время добыча морских гребешков у о. Парамушир не ведется.

Начиная с 1978 г. и по сегодняшний день основной промысел морских гребешков проходит у о. Онекотан, а его интенсивность здесь претерпевала значительные колебания. В период с 1992 по 2000 гг. вылов варьировал в пределах 3,5 – 7,2 тыс. тонн, с 2006 г. вылов снизился наиболее существенно, составив не более 1,5 тыс. т. С 2008 г. величина вылова вновь возросла до 2,5 тыс. тонн. В последние годы отмечено увеличение вылова моллюсков в Северо-Курильской зоне [2]. Это стало возможным благодаря развитию техники глубоководного тралового промысла и обнаружением плотных скоплений моллюсков. С 2016 по 2023 гг. ежегодный вылов морских гребешков у северных Курильских островов стабилизировался на уровне 9 тыс. т.

Таким образом, регулирование рыболовства в отношении морских гребешков Северо-Курильской зоны должно реализовываться только с учетом накопленного опыта в данной сфере при проведении комплексных программ восстановления ресурсного потенциала данного запаса.

По Государственному заданию "Исследования распределения, численности и воспроизводства промысловых беспозвоночных и водорослей, а так же среды их обитания в морских водах РФ в Дальневосточном рыбохозяйственном бассейне в 2022-2-26 гг"

Список литературы

- 1) Скалкин В.А. Светлый гребешок *Chlamys albidus* у острова Онекотан (Курильская гряда) (Mollusca, Bivalvia, Pectinidae) / В.А. Скалкин; Известия ТИНРО, — Т. 95, Ю.-Сах. 1975. — С. 69-77.
- 2) История развития промысла командорского кальмара в водах России и его современное состояние / Д.О. Алексеев [и др]. — М.: Труды ВНИРО. — Т. 170, 2018. — С. 90-104.

ВЫДЕЛЕНИЕ И СВОЙСТВА НОВОГО УГЛЕВОД-СВЯЗЫВАЮЩЕГО БЕЛКА ИЗ ГЕМОЛИМФЫ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА СЕМЕЙСТВА ARCIDAE

Буряк И.А.^{1,2}, Гринченко А.В.^{1,2}, Сокольников Ю.Н.^{1,2}, Кумейко В.В.^{1,2}

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: двустворчатые моллюски, лектины, углевод-связывающие белки, гликозилирование, углеводная специфичность.

Специфическое взаимодействие белков с углеводными лигандами лежит в основе многих важнейших физиологических процессов коммуникации клеток между собой. Особые белки, которые селективно распознают и высокоспецифично связываются с углеводами клеточной поверхности, называются углевод-связывающими. Благодаря структурному разнообразию, уникальной углеводной специфичности и широкому спектру биологической активности углевод-связывающие белки рассматриваются как перспективные кандидаты для диагностики и лечения злокачественных новообразований [1], грибковых [2], бактериальных [3] и вирусных [4] инфекций. Наибольшим разнообразием углевод-связывающих белков отличаются двустворчатые моллюски. Это обуславливает использование представителей данной систематической группы в качестве объектов для выделения и изучения этих белков [5].

Целью данной работы являлся анализ углеводной специфичности агглютининов гемолимфы двустворчатого моллюска *Arca boucardi* и выявление в ней нового углевод-связывающего белка.

В результате фракционирования плазмы гемолимфы *Arca boucardi* сульфатом аммония были получены шесть фракций высаливания. Одна из шести фракций высаливания проявила наибольшую агглютинирующую активность и отличалась наибольшим содержанием белка, вследствие чего была выбрана в качестве целевой для выделения из нее углевод-связывающих белков. Агглютинирующую активность определяли с помощью реакции гемагглютинации, основанной на способности углевод-связывающих белков агглютинировать эритроциты определенных видов животных. Последующее определение концентрации белков проводили с помощью спектрофотометрического метода, основанного на способности ароматических радикалов в аминокислотах белков поглощать свет при длине волны 280 нм. Белки целевой фракции были разделены с помощью аффинной хроматографии на сорбенте с сульфатированным полисахаридом в качестве иммобилизованного лиганда с использованием нескольких видов элюентов. Фракция белков, элюированная цитратным буфером с рН 5, имела наибольшую среди всех фракций аффинной хроматографии концентрацию и агглютинирующую активность. Последующая очистка этой фракции с помощью гель-фильтрации на носителе Sephacryl S-200 HR свидетельствует о наличии в ней кальций-независимого углевод-связывающего белка, представляющего собой мультимерный комплекс, который состоит из полипептидов разной молекулярной массы. Анализ полипептидного состава белковых фракций проводили при помощи электрофореза в полиакриламидном геле в денатурирующих условиях. Оценка углеводной специфичности очищенного белкового препарата с высокой агглютинирующей активностью методом ингибирования реакции гемагглютинации моно-, олиго- и полисахаридами показала уникальный набор распознаваемых структур с высоким сродством к углеводам на основе производных галактозы различной структуры.

Таким образом, в ходе проделанной работы был выделен новый углевод-связывающий белок с кальций-независимой углевод-распознающей активностью, которая характеризуется высоким аффинитетом к галактозе, а также к полисахаридам, которые являются кислыми производными галактозы, что позволяет позиционировать его как потенциальный инструмент для лечения, диагностики и мониторинга патологических процессов в живых организмах, которые на молекулярном уровне характеризуются подобными углеводными детерминантами.

Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственное задание Минобрнауки РФ № FZNS-2023-0017) и РФФИ (грант № 23-76-10051) на площадке ЦКП «Приморский океанариум», НИЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

Список литературы

- 1) Catanzaro E. et al. Antitumor potential of marine and freshwater lectins // *Marine Drugs*. 2020. Vol. 18, № 1. P. 11.
- 2) Nikolakopoulou C., Willment J.A., Brown G.D. C-Type Lectin Receptors in Antifungal Immunity // *Advances in Experimental Medicine and Biology*.
- 3) Breitenbach Barroso Coelho L.C. et al. Lectins as antimicrobial agents // *Journal of Applied Microbiology*. 2018. Vol. 125, № 5. P. 1238-1252.
- 4) Nabi-Afjadi M. et al. Lectins and lectibodies: potential promising antiviral agents // *Cellular and Molecular Biology Letters*. 2022. Vol. 27, № 1. P. 37.
- 5) Chatterjee B.P., Adhya M. Lectins with Varying Specificity and Biological Activity from Marine Bivalves // *Marine Proteins and Peptides: Biological Activities and Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2013. P. 41-68.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОРИК ИНFUЗОРИЙ-ТИНТИННИД В ОСАДКАХ КЕРНОВ LV83-29-1 И LV83-32-1 ИЗ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Василенко Л.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им.
В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: тинтинниды, лорики, море Лаптевых, керны донных осадков.

Отряд Tintinnida (класс Ciliata, тип Ciliophora) — группа планктонных инфузорий, большая часть которых обитает в морской воде. Они играют важную роль в круговороте питательных веществ в водных экосистемах. Для этой группы характерно наличие гиалиновых или агглютинированных лорик (раковин). Лорики тинтиннид хорошо сохраняются после гибели организмов (особенно агглютинированные — состоящие из минеральных частиц, скреплённых органическим веществом). Условия окружающей среды (температура, солёность и наличие минерального компонента) во время строительства лорик, влияют на их окончательный размер, форму и структуру [1]. Таким образом, окончательная морфология лорики отражает историю ее создания, что позволяет использовать тинтиннид в качестве индикаторов экологических и гидрографических изменений. Фауна тинтиннид Арктики включает примерно 48 видов из 16 родов [1].

Цель работы — выявить особенности распределения лорик тинтиннид в верхнеголоценовых отложениях моря Лаптевых.

Материалом для исследования послужили керны донных осадков LV83-29-1 (выход керна 53 см, глуб. воды 15.1 м) и LV83-32-1 (выход керна 256 см, глуб. воды 19.3 м), отобранные в 83 рейсе НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в 2018 г. Частота отбора образцов для микропалеонтологических исследований в керне LV83-29-1 была каждый сантиметр, в керне LV83-32-1 каждый четвёртый сантиметр, начиная с первого (изучены верхние 0–109 см). А.С. Астахов с соавторами [2] на основе распределения неравновесного (атмосферного) изотопа ^{210}Pb рассчитали скорость осадконакопления для короткого керна LV83-32-2 из мультикорера, отобранного на станции LV83-32, приблизительно равной 0,08 см в год.

В керне LV83-29-1 агглютинированные лорики тинтиннид обнаружены по всей длине керна. Они могли принадлежать 5 видам: *Tintinnopsis ventricosoides* Meunier, *Tintinnopsis fimbriata* Meunier, *Tintinnopsis* cf. *turbo* Meunier, *Tintinnopsis* sp. и *Stenosemella nivalis* (Meunier). Лорики вида *Tintinnopsis ventricosoides* Meunier наиболее многочисленны и обнаруживаются по всей длине керна. Лорики вида *T. fimbriata* Meunier встречаются в интервале 5–53 см. Лорики вида *Stenosemella nivalis* (Meunier) встречены только выше горизонта 31 см. По одному экземпляру лорик видов *Tintinnopsis* sp. и *Tintinnopsis* cf. *turbo* Meunier обнаружены в интервалах 26–27 см и 50–51 см, соответственно. Ранее в море Лаптевых был установлен только вид *Tintinnopsis fimbriata* Meunier в планктонных пробах [3]. Следует отметить, что большое количество лорик в осадках не всегда связано с высокой продуктивностью этой группы в планктоне. Так, один экземпляр тинтиннид за период своей жизни может производить несколько лорик [1]. Это связано с тем, что тинтинниды выводят отходы жизнедеятельности внутрь лорики и когда она заполняется, сбрасывают её и образуют новую паралорику. Таким образом, количество лорик в осадке может превышать численность тинтиннид в планктоне.

В керне LV83-32-1 лорики тинтиннид единичны и по морфологическим признакам могут принадлежать 2 видам: *T. ventricosoides* Meunier и *S. nivalis* (Meunier). Лорики первого вида встречены в интервалах 0–5 см, 16–17 см, 28–29 см, 36–37 см и 60–61 см, тогда как второго вида только в интервале 0–5 см. В интервале 64–109 см лорики тинтиннид не обнаружены. Учитывая среднюю скорость осадконакопления в районе станции LV83-32 [2], и используя простую линейную экстра-

поляцию можно предположить, что тинтиниды появились в осадках данного керна более 1000 лет назад.

Анализ распределения лорик тинтинид в кернах донных осадков выявил близкий таксономический состав, но разные количественные характеристики. В поверхностном слое керна LV83-29-1 (0–1 см) лорики тинтинид единичны. Их содержание и видовое разнообразие увеличивается с глубиной ниже 6 см. В керне LV83-32-1 ситуация противоположная. Наибольшее количество и видовое разнообразие лорик тинтинид было обнаружено в поверхностном слое (0–1 см), тогда как в осадках ниже 5 см они встречаются крайне редко. Вероятным объяснением этого являются различные условия осадконакопления в районах расположения станций LV83-29 и LV83-32 в заливах Буор-Хая и Янском, соответственно. Существенное влияние на процесс седиментации здесь оказывают выносы рек Лена и Яна. Согласно схеме [4] станция LV83-29 расположена в зоне преимущественного размыва и перемыва осадков. Она находится у подножья мелководной возвышенности, отмеченной на палеогеографической схеме [5]. Станция LV83-32 расположена в районе со средними глубинами в зоне преимущественной аккумуляции осадков разной зернистости [4]. Активные гидродинамические процессы также могли повлиять на сохранность лорик в осадках.

Таким образом, распределение лорик тинтинид указывает на различные условия осадконакопления в районах расположения изучаемых кернов в заливах Буор-Хая и Янском. Повышенное содержание лорик в керне LV83-29-1, вероятно, вызвано их переотложением в осадках, а пониженное их содержание в керне LV83-32-1 может быть связано с растворением органического вещества, скрепляющего минеральные частицы, на что могли повлиять гидродинамические процессы в северной части Янского залива.

Автор благодарит А.С. Астахова за предоставленный материал.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00107, <https://rscf.ru/project/24-27-00107/>.

Список литературы

- 1) Dolan J.R., Pierce R.W. Diversity and Distributions of Tintinnids. In: Dolan JR, Montagnes DJS, Agatha S et al. (eds). *The Biology and Ecology of Tintinnid Ciliates: Models for Marine Plankton*. UK Wiley-Blackwell, Oxford, 2013. P. 214–243.
- 2) Astakhov A.S., Aksentov K.I., Babich V.V. et al. Ice Coverage of the Laptev Sea and air temperature variation During Recent Centuries: Observed Data and Reconstructions Using a Geochemical Proxy // *Current Chinese Science*, 2022. Vol. 2. P. 198–212.
- 3) Бурковский И.В. Новые данные по тинтинидам (Tintinida, Ciliata) Арктики и ревизия фауны // *Зоологический журнал*. 1976. Т. 55, № 3. С. 325–336.
- 4) Николаева Н.А., Дударев О.В. Минералогический состав поверхностных осадков юго-восточной части моря Лаптевых // *Условия донной седиментации и сопутствующие минералы окраинных морей*, Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 25–29.
- 5) Кошелева В.А. Особенности вещественного состава неоплейстоцен-голоценовых отложений арктических морей России // *Литология и полезные ископаемые*. 2002. № 2. С. 160–171.

СТРОЕНИЕ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПОЛОВОЙ СИСТЕМЫ ЗОЛОТОЙ КАРАКАТИЦЫ *ACANTHOSEPION ESCULENTUM* (CERPHALOPODA, SEPIIDA)

Власова Е. В.¹, Сабилов Р. М.¹, Голиков А. В.²,

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань

²GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel, г. Киль

Ключевые слова: золотая каракатица, репродуктивная биология, оогенез, плодовитость, сперматофорогенез

Каракатицы (отряд Sepiida) широко распространены в умеренных и тропических водах Мирового Океана и имеют высокую промысловую ценность [1]. При этом репродуктивная биология большинства видов изучена слабо и неравномерно. Цель данного исследования – изучить функционирование половой системы и черты репродуктивной биологии золотой каракатицы *Acanthosepion esculentum*, наиболее распространенного и коммерчески ценного вида каракатиц в Юго-Восточной Азии [2].

Исследовано 25 самцов (стадия зрелости V₂; длина мантии (ДМ) – 139–158 мм) и 6 самок (стадия зрелости V₂; ДМ – 137–142 мм) *Ac. esculentum*, из вод выловленных в западной части внутреннего моря Сэто (август, 2008), Япония. Биологический анализ включал измерение ДМ, веса тела, определение стадий зрелости каракатиц. Стадии зрелости определялись по шкале, адаптированной для каракатиц, на основе шкал для других групп головоногих моллюсков [3, 4]. Для самок измерялись массы яичника, яйцеводов, нидаментальных и добавочных нидаментальных желез, длина яйцевода; длина/ширина нидаментальных и добавочных нидаментальных желез; проводился подсчет количества ооцитов и измерение их диаметра; оогенез изучался с применением гистологических методов. Для самцов измерялись массы семенника, сперматофорного комплекса органов (СКО), длина/ширина семенника, длины отделов СКО; проводился подсчет количества, и измерение веса и длины сперматофоров и их внутренних компонентов.

Потенциальная плодовитость самок составила 1701–3719 ($2945,1 \pm 317,30$) ооцитов. Нами было отмечено наибольшее значение плодовитости для данного вида по сравнению с литературными данными [5]. Резорбция ооцитов достигала 13,2% от общего фонда. Анализ количественного соотношения фаз ооцитов показал, что для данного вида характерен групповой-синхронный тип овуляции, с преобладанием превителлогенных ооцитов. Доля превителлогенных ооцитов составила 54,6–88,1 % ($73,8 \pm 4,45$ %) от общего числа. Гистологические исследования выявили отсутствие премейотических ооцитов и ооцитов фазы первичного роста в яичнике зрелых самок. Сперматангии имплантировались в области семяприемника на буккальной мембране, их длина в среднем составила $3,0 \pm 0,12$ мм. Количество сперматангиев составило 19–68 ($35,0 \pm 7,21$).

Для семенника и всех отделов сперматофорной железы был характерен отрицательный аллометрический рост в ходе созревания самцов. Количество сперматофоров составило 146–1698 ($422,7 \pm 79,92$). Были выявлены достоверные положительные корреляции между количеством сперматофоров и общим весом репродуктивной системы. Т.е. самцы с большим весом репродуктивной системы: при весе репродуктивной системы 15,1 г – 1343 сперматофора, при весе репродуктивной системы 16,9 г – 1698. Сперматофоры *Ac. esculentum* имели вид слегка изогнутых цилиндрических трубок, их длина варьировала от 9,0 до 20,0 мм, а в среднем составила $15,0 \pm 0,02$ мм. Относительная длина сперматофоров составила 7,6–13,6% ($9,9 \pm 0,02$ %) ДМ. Сперматофоры состояли из головки, несущей колпачок со сперматофорной нитью, эйякуляторной трубки, цементного тела, семенного резервуара и задней полый части. Наиболее яркой отличительной чертой в строении сперматофора являлась морфология цементного тела, которое состояло из двух частей. Оральная (передняя) часть имела коническую форму и была в 1,5 раза короче аборальной (задней); аборальная часть имела вид вытянутого цилиндра. У самцов золотой каракатицы были установлены

онтогенетические закономерности в изменении длины сперматофоров и их компонентов. Так, сперматофоры зрелых самцов, производимые на более ранних периодах онтогенеза, имели меньшую длину, чем сперматофоры, производимые на более поздних этапах сперматофорогенеза. Кроме того, длина цементного тела, длина и объём семенного резервуара также увеличивались в течении онтогенеза. Таким образом, в течении онтогенеза изменялись свойства сперматофоров путем возрастания эффективности их прикрепительной способности и увеличения объёма запакованной спермы.

В целом, для самок *Ac. esculentum*, как и для большинства изученных видов каракатиц, характерен групповой-синхронный тип овуляции и преобладание превителлогенных ооцитов в яичниках зрелых самок. При этом нами установлена наибольшая потенциальная плодовитость самок – до 4 тыс. ооцитов [5]. Сперматофоры золотой каракатицы являются самыми крупными по сравнению с другими изученными видами каракатиц. При этом, они также отличаются по количеству и форме частей цементного тела [5]. В ходе сперматофорогенеза у самцов *Ac. esculentum* установлено закономерное увеличение длины продуцируемых сперматофоров и количества запакованного в них полового продукта. Это явление также описано в других группах цефалопод и, возможно, является универсальным в разных группах головоногих моллюсков [5].

Список литературы

- 1) Jereb, P. Cephalopods of the world. An annotated and illustrated catalogue.V.1. Chambered nautilus and sepioids / P. Jereb, C. F. E. Roper. Rome, 2005. 262 p.
- 2) Natsukari, Y. Neritic squid resources and cuttlefish resources in Japan / Y.Natsukari, M. Tashiro // Marine Behaviour and Physiology. 1991. V. 18 (3). P.149–226.
- 3) Arkhipkin, A. I. Reproductive system structure, development and function in cephalopods with a new general scale for maturity stages // Journal of Northwest Atlantic Fishery Science. 1992. V. 12. P. 63–74.
- 4) Nigmatullin, C. M.; Sabirov, R. M. Ontogenetic trends in spermatophore formation in coleoid Cephalopods. In Proceedings of the Contribution to Current Cephalopod Research: Morphology, Systematics, Evolution, Ecology and Biogeography. Proc. Conf., Moscow, Russia, 2–4 April 2015, pp. 24–26.
- 5) Vlasova, E. V. Reproductive Biology of the Golden Cuttlefish *Sepia esculenta* (Cephalopoda, Sepiida) / E.V. Vlasova, R.M.Sabirov, A.V. Golikov // Diversity. 2023. V. 15 (455).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫХ ДИНОФЛАГЕЛЛЯТ У БЕРЕГОВ КАМЧАТСКОГО ПОЛУОСТРОВА В АВГУСТЕ-СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА

Войтовская А.И.^{1,2}, Орлова Т.Ю.²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: фитопланктон, динофлагелляты, токсичные виды, распространение, вредоносное цветение микроводорослей.

Серьезным экологическим бедствием является вредоносное цветение фитопланктона, которое сопровождается разрушением прибрежных экосистем, может приводить к отравлениям людей и наносить ущерб экономике прибрежных стран. Микроводоросли продуцируют широкий спектр фикотоксинов и/или биоактивных соединений, оказывающих негативное воздействие на морскую биоту и прибрежные экосистемы в целом [1]. Моллюски-фильтраторы (мидии, устрицы, гребешки), ракообразные и рыбы, многие из которых являются объектами промысла и аквакультуры, способны аккумулялировать фикотоксины микроводорослей до концентраций, летальных для человека.

Виды динофлагеллят, известных как продуценты паралитических (представители рода *Alexandrium*) и диарейных (род *Dinophysis*) токсинов, широко распространены в дальневосточных морях России, включая и прибрежные воды Камчатки [2]. Массовое развитие этих организмов, которое может сопровождаться нейропаралитическими и диарейными отравлениями моллюсками, были ранее зарегистрированы у берегов полуострова Камчатка [3, 4].

Цель работы – исследовать распределение потенциально токсичных динофлагеллят у берегов Камчатки, в пробах морской воды, собранных в ходе экспедиции «Тихоокеанский плавучий университет 2023».

Пробы фитопланктона были отобраны у берегов Камчатки на 86 станциях в рамках экспедиции Тихоокеанского плавучего морского университета на НИС «Профессор Мультиановский», рейс РМ23/4, в период с 15 августа по 20 сентября 2023 г. Отбор проб воды осуществлялся с трех горизонтов (поверхностный, термоклин и пик флюоресценции), при помощи секвентального пробоотборника SBE-32, оснащенного двенадцатью 5-ти литровыми батометрами и CTD-зонда SEA-BIRD 911 plus. Вода с батометров сливалась в бутылки объемом 1,5 л, которые затем помещались в прохладное и затемнённое место, где фитопланктон отстаивался в течение 24 часов. Затем концентрат сливался в фальконы объемом 50 мл и фиксировался при помощи раствора Утермеля (0,1 – 0,2 мл фиксатора на 50 мл пробы) [5]. Всего было собрано 142 пробы фитопланктона, которые были переданы по акту приема-передачи № 1 от 21.09.2023 г. от института Мирового океана и помещены в коллекцию экспедиционных сборов ЦКП «Морской биобанк» для последующей обработки (<http://marbank.dvo.ru/> <http://marbank.dvo.ru/index.php/ru/ekspeditsionnye-kollektsii-expedition-collections/kamch0/ekspeditsiya-2023-g-tikhookenskij-plavuchij-universitet/kamchatka>). Подсчет численности фиксированных организмов проводился в камере “Седвик - Рафтер” под световым микроскопом Imager Z2 (Carl Zeiss, Germany).

В результате обработки проб фитопланктона были получены следующие данные:

В пробах фитопланктона обнаружены виды, известные как продуценты фикотоксинов: вид *Alexandrium catenella* (продуцент токсинов STX – группы) и виды рода *Dinophysis* (продуценты диарейных токсинов) – *D. acuta*, *D. fortii*, *D. norvegica* и *D. rudgei*. *A. catenella* был обнаружен на станциях, расположенных в Авачинском заливе и Авачинской бухте, где его численность варьировала от 200 до 22600 клеток в 1 литре пробы. Максимальная концентрация *A. catenella*

зарегистрирована в Авачинской бухте на станции № 1, в поверхностном горизонте и достигала 92800 клеток в 1 литре воды. В районе Халактырского пляжа (станция № 7) концентрации *A. catenella* составляла 1000 клеток в литре, в бухте Саранная (станция № 18) 1400 клеток в литре и районе мыса Налычева (станция № 11) – 1200 кл/л.

Потенциально токсичный род *Dinophysis* были представлен видами *D. acuta*, *D. fortii*, *D. norvegica* и *D. rudgei*. Виды рода *Dinophysis* были обнаружены на всех исследованных станциях, за исключением станций №6 – 9 в районе Халактырского пляжа, станций № 10 – 13 в районе мыса Налычева и станций № 18 – 19 бухты Саранной. На остальных станциях численность клеток рода *Dinophysis* варьировала от 200 до 400 кл/л. Максимальная концентрация *Dinophysis acuta* 1000 кл/л была зарегистрирована на горизонте 9 м на станции № 25 в Вилочинской бухте.

Полученные нами данные свидетельствуют о необходимости осуществления мониторинга ВЦВ в прибрежных водах Камчатского полуострова. Особое внимание должно быть уделено мониторингу динофлагеллят *A. catenella* и *Dinophysis spp.*, массовое развитие которых может сопровождаться разрушениями прибрежных экосистем, гибелью морских животных и отравлениями людей.

Работа выполнена в рамках научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-01593-23-06), микроскопическая обработка проб фитопланктона поддержана грантом № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

Список литературы

- 1) Hallegraeff G.M., Anderson D.M., Belin C., Bottein M.-Y.D., Bresnan E., Chinain M., Enevoldsen H., Iwataki M., Karlson B., McKenzie C.H., Sunesen I., Pitcher G.C., Provoost P., Richardson A., Schweibold L., Tester P.A., Trainer V.L., Yñiguez A.T., Zingone A. Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts // Communications Earth & Environment. 2021. V. 2. P. 117.
- 2) Коновалова Г.В. Красные приливы в дальневосточных морях России и прилегающих акваториях Тихого океана (Обзор) // Альгология. 1992. Т. 2. №4. С. 87–93.
- 3) Коновалова Г.В. «Красные приливы» у Восточной Камчатки: атлас-справочник. Петропавловск-Камчатский: Камчат, 1995. 56 с.
- 4) Лепская Е.В., Тепнин О.Б., Коломейцев В.В., Курбанов Ю.К., Блохин И.А., Русанова В.А. Результаты мониторинга микроводорослей комплекса вредоносного «цветения» (ВЦВ) в Авачинском заливе в 2022 г. // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2022. №67. С. 46–60.
- 5) Радченко И.Г., Капков В.И., Федоров В.Д. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона. Учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов. Москва: 2010. 60 с.

ВИДОВОЙ СОСТАВ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОФИУР, СОБРАННЫХ В ЭКСПЕДИЦИИ ТИХООКЕАНСКОГО ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА 2023 НА ЮГО-ВОСТОЧНОМ И ЮГО-ЗАПАДНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КАМЧАТКИ

Волкова А.Л.^{1,2}, Рутенко О.А.^{1,2}, Даутова Т.Н.²

¹Дальневосточный федеральный университет (ДФУ), г. Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии им. А. В. Жирмунского Дальневосточного отделения Российской академии наук (ННЦМБ ДВО РАН), г. Владивосток

Ключевые слова: иглокожие, морские ежи, голотурии, морские звезды, офиуры, п-ов Камчатка, распределение, Плавающий университет, Тихоокеанская экспедиция.

Изучение иглокожих имеет важное значение для понимания многих процессов, протекающих в экосистемах Мирового океана. Этот тип беспозвоночных обладает рядом интересных свойств, таких как способность к регенерации, адаптивные механизмы к изменяющемуся уровню кислотности океана. Метаболиты иглокожих обладают противоопухолевой активностью. Иглокожие также играют важную роль в трофических цепях, и являются индикаторами уязвимости морских экосистем. Представители Echinodermata также являются важными объектами для изучения эволюционных процессов [3].

Целью данного исследования является проведение видового таксономического анализа иглокожих на побережье п-ова Камчатка и оценка их численности и биомассы. Одной из важных задач была оценка последствий "красных приливов" 2020-го года [4].

Отбор проб проводился в августе-сентябре 2023 г. в рамках экспедиции «Тихоокеанский Плавающий университет 2023» на борту НИС «Профессор Мультиановский». Сетка станций охватывала юго-восточное и юго-западное побережье п-ва Камчатка.

Сбор проб макрозообентоса проводился коробчатым пробоотборником Vox Coreg (0.1 м²). На каждой станции отбирали по 2-3 пробы, промывали через систему сит с минимальным диаметром ячеек 1 мм по стандартным методикам [1]. Таксономическое определение проводилось согласно Дьконову [2]. Статистические расчёты проводились в программе Statistica 12.

В ходе экспедиции были получены образцы четырех классов типа Иглокожие: офиуры (Ophiuroidea, змеехвостки), морские ежи (Echinoidea), голотурии (Holothuroidea) и морские звезды (Asteroidea). Среди находок офиур были идентифицированы следующие виды: *Amphiodia craterodmeta*, *Ophiura leptoctenia*, *Amphipholis squamata*; среди морских ежей: *Brisaster latifrons*, *Scaphechinus griseus*, *Strongylocentrotus polyacanthus*; среди голотурий: *Cucumaria vegae*, *Molpadia roretzi*; а также морская звезда вида *Leptasterias leptodoma*.

Средняя численность иглокожих на юго-восточном побережье Камчатки $32,95 \pm 7,18$ экз./м², а средняя биомасса $57,49 \pm 18,25$ г/м², на юго-западном побережье численность выше более чем в 3 раза и составляет $108,45 \pm 33,28$ экз./м², однако средняя биомасса в 4 раза меньше $13,98 \pm 3,44$ г/м².

Самой многочисленной группой иглокожих в обоих районах исследования стали офиуры. Максимальное значение численности семейства Amphiuridae отмечено на глубине 80 м, илистый тип грунта, в заливе Камбальный (106 экз./м²), для семейства Ophiolepididae значение аналогичного показателя составило 1480 экз./м² в Охотском море на глубине 620 м на иле. Для юго-восточного побережья максимальные показатели численности составили 13 экз./м² (семейство Amphiuridae, глубина 342-450 м, ил) и 167 экз./м² (семейство Ophiolepididae, глубина 145 м, заиленный песок). Среднее значение биомассы для данного класса одно из самых низких среди остальных групп иглокожих ($1,17 \pm 0,38$ г/м² на юго-восточном побережье и $6,32 \pm 1,66$ г/м² на юго-западном).

В рамках проводимого исследования, второй крупной по численности группой иглокожих стали морские ежи. Максимальные показатели численности на юго-восточном побережье Камчатки

для трех идентифицированных видов составили 93 экз./м² (*Strongylocentrotus polyacanthus*, глубина 105 м, песок глинистый с гравием и галькой), 106 экз./м² (*Scaphechinus griseus*, глубина 55 м, песок заиленный с ракушей), а максимальная численность *Brisaster latifrons* составила 7 экз./м² на глубинах 450-575 м и 29,8 м на илистых грунтах. На юго-западном побережье не было обнаружено представителей семейства Strongylocentrotidae, но для двух других семейств максимальная численность составила 116 экз./м² на глубине 42 м на песке (*Scaphechinus griseus*) и 196 экз./м² на глубине 546 м на илистом песке (*Brisaster latifrons*). По среднему значению биомассы класс морских ежей превосходит остальные (92,08±28,64 г/м² на юго-восточном побережье и 24,22±7,48 г/м² на юго-западном).

Представители класса Holothurioidea в большинстве были найдены на юго-восточном побережье на глубинах 450-800 м на илисто-песчаных грунтах (*Cucumaria vegae*, *Molpadia roretzi*), тогда как на юго-западной части побережья обнаружены только на одной станции на глубине 33 м на песчаном грунте (*Cucumaria vegae*). Среднее значение биомассы голотурий составляет 12,83±9,32 г/м² на юго-восточном побережье.

Морская звезда *Leptasterias leptodoma* обнаружена на юго-западном побережье Камчатки на илисто-песчаном грунте (глубина 50 м).

Полученные данные отражают общую статистику по численности иглокожих в районах проведения исследования, а также подтверждают снижение численности и биомассы бентосной фауны на юго-восточном побережье Камчатки после вредоносного цветения водорослей в 2020 году. Получены данные по малоизученным районам юго-восточного побережья п-ва Камчатка, прилегающим районам Тихого океана и Охотскому морю, в том числе на глубинах свыше 300 м. Проведен видовой таксономический анализ представителей всех семейств. Дальнейшая работа будет направлена на проведение молекулярно-генетических исследований.

Работа выполнена в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Представленное исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект FZNS-2023-0020 «Оценка экологической безопасности речных и прибрежных водных экосистем Камчатского края».

Список литературы

- 1) Абакумова В.А. Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 240 с.
- 2) Дьяконов А.М. Определитель иглокожих дальневосточных морей (Берингова, Охотского и Японского) // Известия ТИНРО. 1949. Т. 30. С. 130.
- 3) Санамян Н.П., Коробок А.В., Санамян К.Э. Качественная оценка последствий влияния вредоносного цветения водорослей осенью 2020 года у побережья юго-восточной Камчатки (северо-западная пачифика) на мелководные бентосные сообщества // Вестник Камчатского государственного технического университета №. 63. 2023. С. 22–44.
- 4) Cobb J. L.S. Neurobiology of the Echinodermata // Nervous systems in invertebrates. Boston, MA: Springer US. 1987. P. 483–525.

ЧТО ОНИ ЧУВСТВУЮТ? ОРГАНИЗАЦИЯ СЕНСОРНЫХ РЕГИОНОВ В
РОПАЛИЯХ *CYANEA TZETLINII* KOLBASOVA et. NERETINA, 2015
(CNIDARIA: SCYPHOZOA)

Домрачева М.М., Хабибулина В.Р.

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: ропалии, сцифоидные медузы, фоторецепция, функциональная морфология, эволюционная биология

Сцифоидные медузы (Cnidaria: Scyphozoa) характеризуются наличием комплексных сенсорных органов – ропалиев, которые позволяют ориентироваться в пространстве и регулируют простые поведенческие реакции. Как правило, в состав ропалиев входят фоторецепторные структуры – пигментные пятна или глазки, орган равновесия – статоцист, а также механо- и хеморецепторные области. Сенсорные участки ропалиев иннервируются элементами комплексной нервной системы, которые могут быть организованы в нервные кластеры. Считается, что ассоциированные с ропалиями нервные сплетения могут играть роль интегративных центров, обеспечивающих координированные движения – например, синхронное сокращение плавательной мускулатуры.

Наиболее подробно организация ропалиев описана на примере Cubozoa [1], [2], [3], в то время как детальное строение ропалиев Scyphozoa известно лишь для модельного объекта *Aurelia aurita* [4]. Недостаток морфологической базы затрудняет молекулярно-генетические исследования происхождения и эволюции комплексных сенсорных органов как в пределах Cnidaria, так и среди низших многоклеточных животных.

Таким образом, целью нашей работы стало получение новых данных об организации ропалиев сцифоидных медуз. Первым объектом изучения стали представители вида *Cyanea tzetlinii* Kolbasova & Neretina, 2015 [5], собранные в Кандалакшском заливе Белого моря. Общая морфология ропалиев была изучена с помощью полутонких срезов. Организация нервной системы в ропалиях была исследована с использованием конфокальной лазерной сканирующей микроскопии. Также нами начато изучение тонкого строения рецепторных участков ропалиев с помощью трансмиссионной и сканирующей электронной микроскопии.

Ропалии *C. tzetlinii* представлены булавовидными структурами, соединенными с краем купола небольшой ножкой и прикрытыми парными кроющими лопастями. Апикальная часть ропалия содержит крупный статоцист, прилегающий к слепозамкнутому каналу гастроваскулярной системы. На субумбреллярной и эксумбреллярной поверхностях ропалия локализуются два пигментных пятна. На полутонких срезах хорошо заметны четыре участка, богатых ресничными клетками – мы предполагаем, что эти области являются сенсорными. Два сенсорных региона локализованы в эпидермисе в области пигментных пятен. По-видимому, эти участки содержат фоторецепторные и пигментные клетки. Третий чувствительный регион локализуется в эпидермисе под кроющей лопастью и, предположительно, представлен механорецепторными клетками. Четвертый рецепторный участок расположен в гастродермисе вблизи статоциста, его функция остается дискуссионной. Данные об организации и предположительных функциях этих сенсорных участков на данный момент дополняются с помощью электронной микроскопии. Основные нервные элементы ропалия выявляются при окрашивании антителами к FMRFамиду и тубулину. Нервная система ропалия имеет вид рыхлой сети. В области четырех описанных сенсорных участков удается визуализировать нервные сплетения, сообщаемые друг с другом отростками. От нервного сплетения, ассоциированного с сенсорным участком под кроющей лопастью, отходят длинные отростки, направленные к «нервному кольцу» купола.

На основе полученных данных можно заключить, что ропалии *C. tzetlinii* имеют более простую организацию, чем ропалии *A. aurita* – это подтверждается отсутствием у *C. tzetlinii* настоящего

глазного бокала и сравнительно более диффузной организацией нервной системы. Можно предположить, что различия в строении ропалиев ассоциированы с разными стратегиями захвата добычи – длинные щупальца *C. tzetlinii* увеличивают площадь «ловчей поверхности» и, следовательно, снижают потребность в частом сокращении плавательной мускулатуры для поиска пищи. В то же время, для сбора такого же количества пищевых объектов медузам *A. aurita*, по-видимому, требуется совершать более интенсивные плавательные движения, регулируемые нервной системой ропалиев [6]. Таким образом, полученные результаты могут дополнить имеющиеся данные об организации сенсорных органов Scyphozoa, однако для понимания общих закономерностей эволюции ропалиев мы планируем провести исследования большего количества представителей сцифоидных медуз.

Материал был собран на учебно-научной базе «Беломорская» СПбГУ. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Хромас» СПбГУ, РЦ «Культивирование микроорганизмов» СПбГУ и ЦКП «Таксон» ЗИН РАН.

Работа выполнена без финансирования.

Список литературы

- 1) Parkefelt L., Ekström P. Prominent system of RFamide immunoreactive neurons in the rhopalia of box jellyfish (Cnidaria: Cubozoa) // Journal of Comparative Neurology. № 3(516). 2009. P. 157–165.
- 2) Martin V.J. Photoreceptors of cubozoan jellyfish // Hydrobiologia. V. 530. 2004. P. 135–144.
- 3) Parkefelt L. et al. Bilateral symmetric organization of neural elements in the visual system of a coelenterate, Tripedalia cystophora (Cubozoa) // Journal of Comparative Neurology. № 3(492). 2005. P. 251–262.
- 4) Nakanishi N., Hartenstein V., Jacobs D.K. Development of the rhopalial nervous system in Aurelia sp. 1 (Cnidaria, Scyphozoa) // Development genes and evolution. V. 219. 2009. P. 301–317.
- 5) Kolbasova G.D. et al. A new species of Cyanea jellyfish sympatric to *C. capillata* in the White Sea // Polar Biology. V. 38. 2015. P. 1439–1451.
- 6) Suchman C.L., Sullivan B.K. Effect of prey size on vulnerability of copepods to predation by the scyphomedusae *Aurelia aurita* and *Cyanea* sp // Journal of Plankton Research. № 12(22). 2000. P. 2289–2306.

**НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ ПО БИОЛОГИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЮ
НИЖНЕАМУРСКОГО ХАРИУСА *THYMALLUS TUGARINAE*, SALMONIDAE:
ТНУМАЛЛИНАЕ РЕК БОЛЬШАЯ УССУРКА И БОЛЬШАЯ СЕВЕРНАЯ
(ПРИМОРСКИЙ КРАЙ) В 2022-2023 ГГ.**

Дорофеев Е.Д.^{1,2}, Шарова А.И.²

¹Приморский океанариум – филиал Национального научного центра морской биологии ДВО РАН, г. Владивосток

²ФГБОУ ВО Дальневосточный технический рыбохозяйственный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: хариус нижнеамурский, р. Большая Уссурка, р. Большая Северная, размерный состав, стадии зрелости гонад, соотношение полов

Хариус нижнеамурский (*Thymallus tugarinae*) – распространенный вид в реках северного Приморья, населяет горные и полугорные водотоки, реофил, литофил [1]. В бассейне реки Большая Уссурка исследования по биологии и распределению вида в среднем течении (кроме р. Арму) не проводились.

Цель настоящего исследования выявление некоторых данных по биологии и распределению нижнеамурского хариуса на реках Большая Уссурка и Большая Северная.

Пробы материала отбирались летом 2022 и 2023 гг. в районе притока р. Амур – р. Большая Уссурка. В качестве орудий лова использовались сети ставные и поплавковые удочки. Ставные сети выполнены из лески (одностенки), оснащенные верхней подборой из пластиковой плавающей веревки и нижней подборой, оснащенной резиновой лентой. Сети использовались с высотой стенки 1,5 и 3 м и ячейей 28 мм, 30 мм, 35 мм. Длина всех трех сетей составляла 30 м. Постановка сетей осуществлялась в затонах, перекрывая выход в основное течение приблизительно в 19:00, когда рыба заходит на ночевку, и выбиралась ориентировочно в 6:00 утра. Станции делались в двух местах в полутора километрах друг от друга. Всего на р. Большая Уссурка было обработано 20 станций в 2022 году и 7 станций в 2023 году.

На р. Большая Уссурка из 20 станций 14 оказались результативными. Уловы хариуса варьировались от 0,023 до 1,243 кг. Размерный состав хариуса нижнеамурского в уловах на р. Большая Уссурка в 2022 году был представлен экземплярами от 9 до 28 см при средней длине особей 16,3 см. Выделяются две модальные группы: первая это особи от 9 см до 13 см, вторая - от 15 до 21 см. Средняя длина самок 15,1 см, самцов - 15,2 см. В 2023 г в р. Большая Уссурка было выполнено 7 станций, в 6 из которых в улове присутствовал хариус. Максимальный улов в одной из станций составил 13 экз. общим весом 1,150 кг. Размерный состав хариуса в р. Большая Северная в 2023 г был представлен от 10 до 25 см, со средним размером 15,9 см, средний размер самок 18,1 см, самцов 17,4 см. Модальную группу составили рыбы размером от 18 до 22 см.

В 2022 г соотношение полов хариуса нижнеамурского в р. Большая Уссурка было 55:45 с преобладанием самцов, хариус находился на II, II-III и III стадиях зрелости.

На р. Большая Уссурка, преобладали неполовозрелая молодежь и половозрелые рыбы с повторно созревающими гонадами, на втором месте впервые созревающие рыбы [1]. На долю самцов на II стадии зрелости приходилось 50%, на II-III стадию зрелости 23,1%, самцы на III стадии зрелости составили 26,9%. Доля самок на II стадии зрелости составила 37,2%, на стадии II-III – 2,3%, III стадии зрелости было 58,1%. В 2023 в р. Большая Уссурка преобладали рыбы с повторно созревающими гонадами, стадия II-III, самцы – 26,4%, самки – 43,4%, на II стадии зрелости самцов было 5,6%, самок 7,5%, самцов на III стадии зрелости гонад было 3,7%, самок 13,2%. Соотношение полов хариуса нижнеамурского в р. Большая Уссурка в 2023 г составило 64,2:37,8 с преобладанием самок. Вероятной причиной преобладания самок могло быть время взятия пробы (июнь), т.к. после нереста самки активно питаются и в поисках пищи, поднимаются в верх по реке, а самцы поднимаются немного позже [3].

Как в 2022 так и в 2023 г., средний коэффициент наполненности желудка хариуса был достаточно высоким, так как в это время происходит нагул. Количество пререкрутов в уловах было минимальным. Очевидно, что нагул в небольших притоках и ключах обусловлен избеганием хищников (ленок, щука и др.) и напряженной пищевой конкуренцией с половозрелыми рыбами, так как их рацион питания схож [3]. Средний коэффициент наполнения желудка, по объединенным данным из двух рек, у молоди составил 3,9, у пререкрутов р. Большая Северная – 3,8, у половозрелых – 3,4.

Кроме хариуса нижеамурского в сети попадались ленок тупорылый (*Brachymystax tumensis*), ленок острорылый (*Brachymystax lenok*), обыкновенный таймень (*Hucho taimen*), налим (*Lota Lota*), серебряный карась (*Carassius gibelio*), китайский гальян (*Rhynchocypris oxycephalus*), гальян лаговского (*Rhynchocypris lagowskii*), гальян чекановского (*Rhynchocypris czekanowskii*), обыкновенный горчак (*Rhodeus sericeus*), омурский язь (чебак) (*Leociscus waleckii*), омурская щука (*Esox reichertii*), подкаменьщик (*Cottus gobio*), обыкновенный пескарь (*Gobio gobio*).

В результате проведенного анализа выявлено, что размерный состав хариуса нижеамурского в 2022, 2023 г. в р. Большая Уссурка был представлен двумя модальными группами. В 2022 г. первая группа - это молодь, средний размер которой составил 12 см, вторую модальную группу составили взрослые особи, со средним размером 18 см. В 2023 г. первая модальная группа составила 11 см, вторая – 19 см. В соответствии с размерным составом гонады рыбы в р. Большая Уссурка в 2022 г. находились в основном на II и III стадии зрелости, а в 2023 г. преобладала стадия недавно отнерестившихся особей – II-III. Средняя стадия наполнения желудка у всех возрастных групп была достаточно высокая. В нагульный период хариуса это достигается путем деления пищевой ниши на различных участках бассейна р. Большая Уссурка. Кроме того, наиболее уязвимая группа (пререкруты) при этом избегает хищников.

Исследования проведены на площадке ЦКП «Приморский океанариум», ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

Список литературы

- 1) Антонов А.Л., Барабанщиков Е.И., Золотухин С.Ф. и др. Рыбы Амура. Владивосток: Всемирный фонд дикой природы (WWF). 2019. 318 с.
- 2) Правдин А.В. Руководство по изучению рыб. Л.: Ленинградский государственный университет. 1939. 7 с.
- 3) Тесленко В.А., Тиунова Т.М., Михеев П.Б., Макаренченко М.А. Питание Нижнеамурского хариуса *Thymallus tugarinae* (Thymallidae) в р. Лимури (Нижний Амур). Владивосток: Биолого-почвенный институт ДВО РАН. 2011. 53-56 с.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИПИДНОГО СОСТАВА НЕКОТОРЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ МОРСКИХ ВОДОРΟΣЛЕЙ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Другова Е.С., Фоменко С.Е., Кушнерова Н.Ф.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: *Ahnfeltia tobuchensis*, *Sargassum pallidum*, *Ulva lactuca*, нейтральные липиды, фосфолипиды, жирные кислоты.

Около 70% всей поверхности нашей планеты занимает Мировой океан, который населяют разнообразные представители морских организмов. В их числе водоросли, которые являются важным компонентом морских экосистем. В состав водорослей входят разнообразные химические соединения: полисахариды, каротиноиды, полифенолы, минеральные вещества, липиды, аминокислоты и др. [1]. Одними из основных компонентов морских макрофитов являются липиды и незаменимые жирные кислоты, выполняющие определенные физиологические функции и имеющие широкое практическое применение. В клетках растений они являются источником энергии, структурными компонентами клеточных мембран, а также участвуют в процессах фотосинтеза [2]. Содержание липидов в морских водорослях может меняться в зависимости от условий обитания, сезона и температуры водоема, который населяют данные виды [3]. При этом климатические условия определенной местности оказывают существенное влияние на их биохимический состав.

Целью данного исследования явилось сравнительное изучение качественного и количественного состава липидного комплекса выделенного из трех видов морских макрофитов, принадлежащих к разным отделам: *Ulva lactuca* (Chlorophyta), *Sargassum pallidum* (Phaeophyta), *Ahnfeltia tobuchiensis* (Rhodophyta).

Образцы водорослей собирали в летний период в проливе Старка мыса Дараган о. Попова Японского моря. Для максимального очищения талломов от песка, зообентоса и разных загрязнений водоросли промывали в морской воде, затем в пресной воде. Далее погружали в кипящую воду на 2 мин для ингибирования активности ферментов, после чего отжимали и высушивали в естественных условиях до сухо - воздушного состояния (при остаточной влажности ~30 - 40%). Высушенные образцы водорослей измельчали на лабораторной мельнице, просеивали через сито (размер ячеек 0,5 мм) и хранили при температуре -20 °С для проведения всех последующих аналитических процедур. Экстракцию липидов из высушенного сырья проводили в соответствии с общепринятым методом для выделения липидов из растительного и животного сырья [4]. Содержание общих липидов в экстракте определяли взвешиванием высушенных до постоянного веса аликвот экстракта в 3-ти повторностях. Качественный и количественный состав липидов определяли с помощью метода микротонкослойной хроматографии (ТСХ) на силикагеле, используя системы для разделения растительных гликолипидов и фосфолипидов. Хроматографическое распределение нейтральных липидов по фракциям и их количественное определение проводили методом одномерной ТСХ. Определение жирно-кислотного состава липидной фракции водорослей проводили методом газо-жидкостной хроматографии. Для этого получали метиловые эфиры жирных кислот путем переэтерификации липидов по методу Carreau и Dubacq [5]. Жирные кислоты идентифицировали сравнением времени удерживания со стандартами и значениям «углеродных чисел». Результаты рассчитывали в процентах от общей суммы жирных кислот.

Проведенная оценка качественного и количественного состава липидов в экстрактах исследуемых морских водорослей с помощью ТСХ показала, что их содержание значительно варьирует у разных видов макрофитов. Так, общие липиды составляли в среднем у *U. lactuca* - 28,05±0,18; у *S. pallidum* - 26±0,23; и существенно ниже у *A. tobuchiensis* - 15,35±0,22 (мг/г сухой ткани).

В составе общих липидов в экстрактах всех трех видов водорослей преобладали гликолипиды (30,3 - 41,5%) и нейтральные липиды (34 - 48,5%), на долю фосфолипидов приходилось 10 -

25,7% от суммы липидов. В составе нейтральных липидов всех водорослей преобладали триацилглицерины и свободные стеринны. Наибольшее количество триацилглицеринов отмечалось у *A. tobuchensis*, а свободных стериннов – у *S. pallidum*. В содержании индивидуальных фракций фосфолипидов были выявлены существенные отличия, как по составу, так и по содержанию. Преобладающими по содержанию фосфолипидными фракциями в экстракте *U. lactuca* были фосфатидилглицерин, фосфатидилэтанолами и фосфатидилинозит, *S. pallidum* – фосфатидилэтанолами и фосфатидилглицерин, *A. tobuchiensis* – фосфатидилхолин и фосфатидилглицерин. При анализе процентного содержания основных видов жирных кислот, входящих в состав липидной составляющей исследованных видов водорослей, было выявлено, что наибольшее количество ПНЖК семейства n-6 содержится в экстракте бурой водоросли *S. pallidum*. В образцах зеленой водоросли *U. lactuca* отмечалось наибольшее количество ПНЖК семейства n-3. В липидной фракции красной водоросли *A. tobuchiensis* среди ПНЖК доминировали арахидоновая (семейство n-6) и эйкозопентаеновая (семейство n-3) кислоты.

Полученные в настоящей работе сравнительные данные липидного состава позволяют получить дополнительные сведения к уже известным представлениям о физиологическом состоянии морских водорослей, относящихся к разным таксономическим группам, в летние месяцы. Распространенность и массовость исследованных видов водорослей в дальневосточных морях делает их перспективными для получения липидных комплексов, что может найти широкое применение в качестве биологически активных добавок и источников лекарственного сырья.

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБУН Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева ДВО РАН по теме № 11 «Эколого-биогеохимические процессы в морских экосистемах: роль природных и антропогенных факторов», (0211-2021-0014). Регистрационный номер: 121-21500052-9.

Список литературы

- 1) Michalak I., Chojnacka K. Algae as production systems of bioactive compounds - A review // Eng. Life Sci. 2015. V. 15. P. 160–176.
- 2) Goncharova S.N., Kostetsky E.Y., Sanina N.M. The effect of seasonal shifts in temperature on the lipid composition of marine macrophytes // Russ. J. Plant Physiol. 2004. V. 51, № 2. P. 169–175.
- 3) Sanina N.M., Goncharova S.N., Kostetsky E.Y. Seasonal changes of fatty acid composition and thermotropic behavior of polar lipids from marine macrophytes // Phytochemistry. 2008. V. 69. P. 1517–1527.
- 4) Bligh E.G., Dyer W.J. A rapid method of total extraction and purification // Can. J. Biochem. Physiol. 1959. № 37. P. 911–917.
- 5) Carreau J.P., Dubaco J.P. Adaptation of Macro-Scale Method to the Micro-Scale for Fatty Acid Methyl Transesterification of Biological Lipid Extracts // J. Chromatogr. 1978. V. 151. P. 384–390.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОКОЯЩИХСЯ СТАДИЙ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В СОВРЕМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ПРИБРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Зверева А.Ю.^{1,2}, Орлова Т.Ю.², Морозова Т.В.²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²«Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского» ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: биогеографические характеристики, покоящиеся стадии, цисты, динофлагелляты, поверхностные осадки, Камчатка

Антропогенное загрязнение вод и изменение климата приводят к массовым вспышкам («красным приливам») численности потенциально-токсичных и вредоносных видов микроводорослей.

В распространении видов, инициирующих «красный прилив», важную роль играют их покоящиеся стадии (цисты и споры) [1]. В результате заноса балластными водами судов и/или течениями, а также способности выживания в течение достаточно продолжительного времени (по некоторым данным до 100 лет), они могут обеспечивать успешное «внедрение» и расселение в прибрежных экосистемах новых географических зон. Поэтому покоящиеся стадии микроводорослей широко используются в качестве биоиндикаторов климатических изменений среды, в частности гидрологического режима и экологических особенностей среды обитания. Данные о распространении цист и спор позволяют дополнить и уточнить биогеографические характеристики видов фитопланктона.

Целью работы является изучение распространения видов покоящихся стадий микроводорослей в прибрежных водах юго-западной и юго-восточной зон полуострова Камчатка. В задачи исследования вошло описание покоящихся стадий микроводорослей (динофлагелляты и диатомовые водоросли). Полученные данные важны для понимания долговременных изменений в структуре фитопланктона побережья Камчатки.

Пробы поверхностных осадков были отобраны у берегов Камчатки на 48 станциях в рамках экспедиции Тихоокеанского плавучего морского университета, НИС «Профессор Мультановский», рейс РМ23/4 [2], 15 августа-20 сентября 2023 г. Отбор осуществлялся при помощи box-corer по стандартным методикам [3]. Всего было собрано 48 проб, которые были переданы по акту приема-передачи от 24.09.2023 г. от института Мирового океана и помещены в коллекцию экспедиционных сборов ЦКП «Морской биобанк» для последующей обработки. Латинские названия видов приводятся в соответствии с электронными базами данных AlgaeBase [4]. Микроскопические исследования проб проведены на приборной базе ЦКП «Морской биобанк» ННЦМБ ДВО РАН [5].

Предварительно в исследованном районе обнаружено 21 морфотипов (5 морфотипов определены до рода, 14 до вида.), включая цисты динофлагеллят, известных как продуценты фикотоксинов и споры диатомей, вызывающих ВЦВ. Для нескольких морфотипов получены данные только по их принадлежности к соответствующим отрядам. Также были идентифицированы некоторые виды спор диатомей. Ниже приведен список наиболее распространенных видов:

Dinophyta: Порядок Gonyaulacales: *Alexandrium catenella*, *Gonyaulax elongata*, *Protoceratium reticulatum*.

Порядок Peridinales: *Preperidinium meunieri*, *Protoperidinium americanum*, *Protoperidinium claudicans*, *Protoperidinium conicoides*, *Protoperidinium conicum*

Порядок Thoracosphaerales: *Scrippsiella crystallina*.

Bacillariophyta: Порядок Chaetocerales: *Chaetoceros diadema*, *Chaetoceros mitra*.

Среди обнаруженных морфотипов присутствуют и вредоносные: виды родов *Alexandrium* и *Protoceratium*.

Наибольшее видовое разнообразие (12 морфотипов) на данный момент отмечено в водах Авачинской бухты и Авачинского залива в районе Халактырского пляжа.

Полученный материал будет использован для проращивания цист и получения культур микродорослей, включая потенциально-токсичные виды и виды, вызывающие ВЦВ.

Сбор материала выполнен в рамках научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Микроскопические исследования проб осуществлялись при поддержке федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Соглашение № 169-15-2023- 002).

Список литературы

- 1) Коновалова Г.В. "Красные приливы" и "цветение" воды в дальневосточных морях России и прилегающих акваториях Тихого океана // Биология моря. 1999. Т. 25, № 4. С. 263-273.
- 2) Беспмятнова П. Возвращение экспедиции с Дальнего Востока / Беспмятнова П. [Электронный ресурс] // "За науку" : [сайт]. — URL: <https://zanauku.mipt.ru/2023/09/22/vozvratshhenie-ekspeditsii-s-dalnego-vostoka/> (дата обращения: 14.02.2024).
- 3) Anderson D.M., Aubrey D.G., Tyler M.A., Coats D.W. Vertical and horizontal distributions of dinoflagellate cysts in sediments // Limnol. Oceanogr. Vol. 27. 1982. P. 757–765.
- 4) Guiry, M.D. & Guiry, G.M World [U+2012] wide electronic publication. – National University of Ireland, Galway. / Guiry, M.D. & Guiry, G.M [Электронный ресурс] // AlgaeBase. : [сайт]. — URL: <https://www.algaebase.org> (дата обращения: 14.02.2024).
- 5) ЦКП «Морской биобанк» НИЦМБ ДВО РАН [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://marbank.dvo.ru/index.php/ru/?start=8> (дата обращения 30 декабря 2023).

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЙОБЕНТОСНЫХ ОРГАНИЗМОВ С ТЕЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ НА ПРИМЕРЕ СОЛОНОВОДНОГО АКВАРИУМА

Зенина А.И., Власова Е.В.

Казанский (Приволжский) Федеральный университет, г. Казань

Ключевые слова: мейобентос, закономерности распределения, Annelida, Crustacea, Foraminifera.

На сегодняшний день проблемы, связанные с созданием и поддержанием аквариумных биоценозов не получили широкого распространения. Данная работа была нацелена на повышение уровня изученности данной темы, расширение имеющейся информации о проживающих в аквариумах видах мейобентосных организмов и понимание процессов перемещения оных в пределах аквариума, равно как и нахождения закономерностей в названных процессах[1].

Нами был получен живой камень из прибрежной зоны Индонезии, после он был помещен в аквариум объемом в 202 литра, имеющим на дне сантиметровое покрытие из стерильного кварцевого песка. После запуска аквариума нами отслеживался процесс расселения мейобентосных организмов посредством забора проб аквариумного грунта и анализа их содержимого. Пробы забирались два раза в неделю из заранее установленных частей аквариума, промывались морской водой и фиксировались в 4 % растворе формалина. Нами было забрано двадцать три серии проб аквариумного грунта, что составило в общей сложности 207 образцов объемом около двадцати пяти миллилитров каждый. Каждая серия включала в себя девять проб грунта из заранее установленных точек, таким образом отслеживалось перемещение мейобентосных организмов в рамках аквариума и выявлялись сопутствующие закономерности. В каждой пробе производился количественный учёт всех найденных животных. Животные, находящиеся в данных пробах, были выбраны из субстрата, подсчитаны и определены как минимум до семейства. В дальнейшем это дало нам представление о составе мейофауны и изменении его численности со временем в разных точках.

В итоге в пробах были найдены представители семи типов: Arthropoda, Annelida, Foraminifera, Cnidaria, Mollusca, Nematoda, Porifera. Самой массовой группой были членистоногие, составляющие 89,7% от всех найденных в аквариуме организмов, за ними следовали кольчатые черви - 4,6% и фораминиферы — 2,3%[2].

В ходе изучения перемещения животных в аквариуме было выявлено, что местом концентрации оных являлся фильтр, предположительно из-за большей аэрации воды в этом месте и созданию течения, потенциально приносящего кормовые объекты. Так как самым многочисленным семейством было Ameiridae из подкласса Copepoda, составлявшее порядка 89 % от всех найденных животных, основные колебания численности были связаны именно с ним. Нами было замечено два ярких взрыва численности, промежуток между которыми составил сорок семь дней, что позволяет предположить сорокасемидневный цикл развития для копепод, составлявших эту вспышку.

Таким образом нами было проведено исследование, призванное выявить закономерность расселения мейобентосных организмов в аквариуме. В рамках его проведения был выяснен полный таксономический состав, характерный для используемого живого камня и тестового аквариума соответственно; были обнаружены принципы, по которым происходит расселение мейобентосных организмов; были найдены паттерны изменения численности организмов со временем, где единственным достоверным объяснением закономерности распределения животных в аквариуме является предположение о том, что около фильтра аккумулируются кормовые объекты, привлекательные для копепод, что является причиной их перемещения к данной зоне.

Список литературы

- 1) Антонов С.В. Морской аквариум. М.: АСТ, 2001. 80 с.
- 2) Schmidt-Rhaesa A. Guide to the Identification of Marine Meiofauna. Munchen: Verlag Dr. Friedrich Pfeil, 2020. 607 p.

**СРАВНЕНИЕ ТЕМПОВ РОСТА КАЛЬМАРОВ *BERRYTEUTHIS MAGISTER*
BERRY, 1913 И *BERRYTEUTHIS SEPTEMDENTATUS* SASAKI, 1915
(GONATIDAE: COLEOIDEA).**

Зими́на В.Р.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: кальмар, Berryteuthis, рост, возраст, регистрирующие структуры

Кальмары рода *Berryteuthis* Naef, 1921 – наиболее массовые представители семейства Gonatidae, широко распространены в Северной Пацифике. Также представители этого рода – важнейшие промысловые виды кальмаров в водах России. Наиболее интенсивно добывается у Курильских островов и в Беринговом море вид *B. magister* Berry, 1913. Второй вид рода – *B. septemdentatus* Sasaki, 1915 считается перспективным для промысла в Японском море, образует плотные скопления на банке Кита-Ямато в центральной части моря, где добывался в небольшом количестве в 1970-1980-е годы XX века. В связи с указанными особенностями этих видов важно изучение их популяционной биологии, в частности – изучение особенностей их роста и возраста по регистрирующим структурам.

Долгое время считалось, что *B. magister* имеет очень широкий ареал, от северной части Берингова моря до Японского моря на западе и Орегона на востоке [1]. При этом виды Японского моря считалось самостоятельным подвидом – *B. magister shevtsovi* Katugin, 2000. Однако в 2022 г. было отмечено, что этот таксон имеет ряд характеристик, требующих повышения его ранга до видового. В связи с этим было восстановлено в качестве валидного, название *B. septemdentatus* [2]. Этот вид кальмара ограничен в своем ареале акваторией Японского моря [3].

Изучение роста, возраста и продолжительности жизненного цикла данных видов кальмаров имеет ключевое значение для прогнозирования динамики численности их популяций и оценки общего допустимого улова (ОДУ). Для популяций командорского кальмара в Беринговом море рост и возраст были исследованы по регистрирующим структурам (статолитам и гладиусам), на которых прослеживались суточные отметки роста [4]. Для вида *B. septemdentatus* из Японского моря исследований роста и возраста до настоящего времени не проводилось, за исключением работы Лу с соавторами [5], оценивших возраст и темпы роста мелкоразмерной молодежи этого вида.

В ходе работы были исследованы кальмары, собранные из траловых уловов НИС «Бухоро» 11.07.2014 г. и 18.07.2014 г. (экспедиция ФГБНУ «ТИНРО-Центр»), на свале глубин в заливе Петра Великого Японского моря (Приморский край). Всего было собрано 97 экземпляров кальмаров. У всех проанализированных кальмаров была извлечена пара статолитов из органов равновесия – статоцистов, через разрез с вентральной стороны в основании головы позади воронки. Для хранения статолиты помещали в пробирки с 96% этиловым спиртом. Для определения возраста кальмара *B. septemdentatus* были использованы статолиты от 38 кальмаров. Обработка статолитов выполнялась по методике, позволяющей оценивать возраст кальмаров по суточным отметкам прироста. Для сравнения темпов роста двух видов кальмаров использовались литературные данные, полученные на обширном материале командорского кальмара *B. magister* [4]. Для сравнения размерно-возрастных характеристик *B. septemdentatus* и *B. magister* исследованный материал был разбит на размерные классы (по длине мантии) 141-170 мм и 171-190 мм и более 190 мм. В связи с малым размером выборки дополнительного разделения на самцов и самок не производилось.

В результате, из 38 оцененных *B. septemdentatus* 14 экз. оказалось в размерном классе 141-169 мм, их возраст составил от 157 до 221 дней. Для командорского кальмара *B. magister* из Берингова

моря самки указанной размерной группы были возрастом от 180 до 240 дней, а самцы — от 175 до 200 дней [4]. Возраст 15 кальмаров с длиной мантии от 172 мм до 187 мм варьирует от 162 до 246 дней. Аналогичный размерный класс для самок и самцов *B. magister* из Берингова моря располагается в возрастном диапазоне от 225 до 275 дней. В размерном классе 191 мм – 203 мм по длине мантии возраст был определен у 9 особей *B. septemdentatus*. Он варьирует от 191 до 233 дней. У командорского кальмара из Берингова моря самки указанной размерной группы были возрастом 275 дней, а самцы — 250-280 дней. Приведенное сравнение возраста сходных размерных классов показывает, что исследованные кальмары *B. septemdentatus* при размерах от 141 до 203 мм по длине мантии имели заметно более высокие темпы роста, нежели *B. magister* из Берингова моря. Однако, тот факт, что максимальные размеры, достигаемые япономорскими кальмарами, значительно уступают максимальным размерам беринговоморских кальмаров, указывает на то, что на каком-то этапе онтогенеза *B. magister* начинает опережать по темпам роста *B. septemdentatus*.

Подобные отличия двух видов друг от друга могут быть связаны с разницей условий их обитания. Для обоих видов характерна смена экологической жизненной формы и биотопов в процессе онтогенеза. Параларвы и ранняя молодь обоих видов обитают в эпипелагиали, где ведут планктонный образ жизни. С ростом они переходят к нектонному образу жизни и опускаются в придонные слои мезопелагиали, где обитают, преимущественно, на глубинах от 200 до 600 м (в Японском море и несколько глубже). *B. septemdentatus* растет и нагуливается при температурах более высоких, нежели молодь *B. magister*: в теплый сезон температуры приповерхностного слоя воды Японского моря достигают +16-21°C, тогда как для Берингова моря приповерхностные температуры не превышают +10-12°C. Вероятно, именно на этом этапе молодь япономорского кальмара может обгонять по темпам роста молодь командорского кальмара в Беринговом море.

Список литературы

- 1) Бизиков В.А., Филиппова Ю.А. Российский промысел головоногих моллюсков имеет шансы на возрождение // Рыбное хозяйство. 1999. №1. С. 32–36
- 2) Katugin O.N. A new subspecies of the schoolmaster gonate squid, *Berryteuthis magister* (Cephalopoda: Gonatidae), from the Japan Sea // The Veliger. 2000. № 43 (1). С. 82–97.
- 3) Alexeyev D.O., Katugin O.N., Bizikov V.A. Taxonomic status of squids of the genus *Berryteuthis* Naef, 1921 (Gonatidae, Oegopsida) inhabiting the Sea of Japan // Ruthenica, Russian Malacological Journal. 2022. №32 (2). С. 53–59.
- 4) Arkhipkin A.I., Bizikov V. A., Nesis K.N. Distribution, stock structure, and growth of the squid *Berryteuthis magister* (Berry, 1913)(Cephalopoda, Gonatidae) during summer and fall in the western Bering Sea // Fishery Bulletin. 1996. № 94. С. 1–30.
- 5) Lu, H.J., Ou, Y.Z., Teng Y., Chen, Z.Y., Chen, X. Age, Growth and Population Structure Analyses of the *Berryteuthis magister shevtsovi* in the Japan Sea by Statolith Microstructure // Fishes. 2022. №7 (5). С. 215.

МЕТОДИКА СБОРА И ПОДГОТОВКА ПРОБ ФИТОПЛАНКТОНА ДЛЯ КРИОКОНСЕРВАЦИИ В ЦКП РК «МОРСКОЙ БИОБАНК»

Зинов А.А., Орлова Т.Ю.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: биобанк, криоконсервация, микроводоросли, пробоотбор

В 2017 году на базе существующих уникальных биологических коллекций, находящихся в Национальном научном центре биологии моря ДВО РАН (ННЦМБ ДВО РАН) во Владивостоке была сформирована ресурсная коллекция (РК) ЦКП «Морской биобанк» (МВРУ). Целью ЦКП РК «Морской биобанк» является обеспечение проведения научных исследований с использованием имеющихся коллекций и оборудования в соответствии с международными протоколами сбора, каталогизации, поддержания и хранения биологических образцов морского происхождения.

В РК «Морском биобанке» хранятся различные коллекции биообразцов: живых микроорганизмов, морских генетических ресурсов, а также важную часть составляют экспедиционные коллекции, где содержатся образцы различных морских организмов, собранных в Дальневосточных морях России, Тихом океане, Арктике и Антарктике. В данной работе представлена методика сбора проб микроводорослей и их подготовка к хранению в низкотемпературных хранилищах.

Уникальность нашего центра заключается в том, что в России практически нет биобанков специализирующихся на хранении широкого спектра морских, биологических образцов. Важную часть работы биорепозитория составляет создание стандартов по сбору биоматериала и подготовки его к длительному хранению. В данной работе, на примере фитопланктона, впервые представлены данные по технологии отбора проб для биобанкинга.

Сбор образцов можно разделить на 4 этапа: отбор проб, предварительная обработка и консервация в условиях экспедиции, транспортировка подготовленных образцов и загрузка в криохранилища, паспортизация образцов и загрузка информации на сайт ЦКП «Морской биобанк» (<http://marbank.dvo.ru>).

Пробу фитопланктона отбирают с помощью планктонной сети. В случае высокой плотности клеток микроводорослей в воде, можно отобрать пробу с поверхностного слоя (0,2-0,5 м), используя чистые ёмкости, образцы желательно обернуть алюминиевой фольгой, чтобы предотвратить попадание на них света [1, 2]. Помимо планктонной сети, для отбора проб рекомендуется использовать батометры. Для водоемов богатых питательными веществами, объема пробы в 1 л должно быть достаточно, а для низкопродуктивных водоемов с низким содержанием питательных веществ необходимы большие объемы [2].

Пробу, отобранную с помощью батометра необходимо сконцентрировать, для этого используется установка обратной фильтрации с фильтром в 1 мкм. Затем промывается фильтр в чашке Петри и полученный концентрат пипетируем по штрих-кодированным криопробиркам объемом 2 мл. Как правило, в пробе, отобранной с помощью планктонной сети, плотность клеток достаточно высокая, соответственно нет необходимости в концентрации.

Затем в криопробирки с образцами добавляются криопротекторы. При замораживании материала необходимо их использовать во избежание структурно-функциональных повреждений в клетках микроводорослей. Криопротекторы делятся на две группы: проникающие (низкомолекулярные вещества, например, глицерин, диметилсульфоксид (ДМСО)) и непроникающие (высокомолекулярные вещества, например, трегалоза). Для криосохранения морских микроводорослей обычно выбирают ДМСО [3]. Как правило, используются концентрации криопротекторов от 5 до 15%, однако при положительных температурах при концентрациях выше 0,05% эти вещества оказывают токсическое действие на клетки [4]. Также использование только одного проникающего криопротектора может привести к нарушению структуры клетки.

Комбинация двух групп протекторов значительно повышает степень сохранности клеток микроводорослей при криоконсервации и увеличивает скорость восстановления культуры после оттаивания [5]. Для подготовки к заморозке проб фитопланктона используется протекторная смесь из ДМСО 5-7,5% и трегалоза 1,5-3% от общего объема соответственно.

После добавления протекторной смеси, штатив с криопробирками помещается на шейкер на 5 минут при средней мощности. Затем сканируется каждая криопробирка и сохраняется идентификационный номер в документе. После шейкера пробы переносятся в специальный штатив для заморозки -1°C/мин и помещаются в морозильную камеру при -20°C. Через 30 мин. криопробирки можно достать из штатива и разместить в морозильной камере.

Транспортировку проб с судна в криохранилище необходимо осуществлять в кратчайшие сроки, не допуская размораживания. Доставка образцов происходит непосредственно в морозильной камере (отключенной от сети), по возможности в течение 1-2 часов. Далее образцы загружаются в криохранилище при -80°C на протяжении двух суток. В случае невозможности доставки в такие сроки, используются термоконтейнеры с сухим льдом, по прибытию в лабораторию данные образцы сразу перегружаются в криохранилище при -20 и -80°C.

Загруженные образцы снабжаются обширным информационным паспортом, размещенным на сайте «Морского биобанка» (<http://marbank.dvo.ru>). В паспорте указывается: индивидуальный цифровой-буквенный код образца, дата отбора, место сбора с координатами, орудие лова, глубина отбора, тип образца, объем образца, температура хранения, использованный криопротектор, Ф.И.О. ответственного за отбор. Некоторые образцы могут дополняться различными комментариями. Также вся информация по биобразцам дублируется в базу данных «Арктикс», где хранятся данные о месте хранения, расположения и состояния каждой единицы хранения.

Данное исследование было поддержано Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Соглашение № 169-15-2023-002).

Список литературы

- 1) Gifford D.J., Caron D.A. Sampling, preservation, enumeration and biomass of marine protozooplankton // ICES Zooplankton Methodology Manual. Elsevier. 2000. P. 193–221.
- 2) Corrales C, Luciano S, Astrin J.J. Biodiversity Biobanking – a Handbook on Protocols and Practices. ARPHA Preprints. 2023.
- 3) Day J.G., Brand J.J. Cryopreservation methods for maintaining cultures // Algal culturing techniques. New York: Academic Press. 2005. P. 165–187.
- 4) Одинцова О.Г., Борода А.В. Криосохранение клеток и личинок морских гидробионтов // Биология моря. 2012. том 38, № 2, С. 93–103.
- 5) Борода А.В., Айздайчер Н.А., Одинцова О.Г. Способ криосохранения морских микроводорослей. № патента 2496318. 2013.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИТОПЛАНКТОНА ДВУХ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОЕМОВ, НАХОДЯЩИХСЯ НА РАЗНЫХ СТАДИЯХ ОТДЕЛЕНИЯ ОТ БЕЛОГО МОРЯ

Иванова Д.А.¹, Краснова Е.Д.², Воронов Д.А.³, Радченко И.Г.¹

¹ Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, г. Москва

² Беломорская биологическая станция им. Н.А.Перцова МГУ им. М.В.Ломоносова, пос. Приморский, респ. Карелия

³ Институт проблем передачи информации им. А.А.Харкевича РАН, г. Москва

Ключевые слова: фитопланктон, отделяющиеся водоемы, меромиксия, стратифицированные озера, Белое море

На беломорском побережье вследствие послеледникового поднятия суши морские заливы постепенно отделяются от моря и превращаются в пресноводные озёра, проходя через меромиктическую стадию – когда в глубине водоём хранит воду, солёность которой может превышать солёность материнской акватории, а на поверхности происходит опреснение, вызванное таянием льда и снега весной и поступлением пресной воды с ручьями [1]. Разница в плотности слоёв такого озера делает невозможным перемешивание водной толщи, и водоём остаётся постоянно стратифицированным. Изоляция и специфические гидрологические условия в беломорских водоёмах приводят к развитию в них биоты, отличной от биоты материнской акватории. Целью данной работы было сравнить сукцессию фитопланктона одновременно в двух водоёмах, находящихся на разных стадиях изоляции от моря, в течение всего вегетационного периода водорослей в 2021 г. Для настоящего исследования были выбраны озеро Кисло-Сладкое и озеро Еловое в окрестностях ББС МГУ им. Н.А.Перцова.

Для исследования фитопланктона на станции с максимальной глубиной (4,5 м) в каждом озере отбирали пробы воды объемом до 1 л с помощью погружного насоса Whale Premium Submersible Pump GP1352 с нескольких горизонтов до границы с сероводородной зоной. Пробы фиксировали формалином с конечной концентрацией 2% и концентрировали методом обратной фильтрации. Клетки водорослей идентифицировали, измеряли и подсчитывали в камере Нажотта на микроскопе МИКМЕД-6 при увеличении $\times 200$ и $\times 400$ в трех повторностях. Для расчета углеродной биомассы объемы клеток определяли методом геометрического подобия [2] с последующим переводом в единицы углерода [3]. Современную классификацию водорослей приводили по электронной базе данных «World Register of Marine Species». Статистический анализ сходства структуры фитопланктона проводили с использованием пакета программ «PRIMER (v.6.1.6)».

В период исследований с марта по октябрь 2021 г. в оз. Кисло-Сладкое было обнаружено 64 вида и надвидовых ранга, в оз. Еловое – 70, принадлежащих отделам Bacillariophyta, Myzozoa, Cyanobacteria, Ochrophyta, Chlorophyta, Charophyta, Cercozoa, Cryptophyta, Euglenozoa. В оз. Еловое отмечено большее количество пресноводных таксонов. Установлена низкая степень сходства видового состава озер. Общими для двух озер оказались 20 видов.

Биомасса фитопланктона в толще воды в оз. Кисло-Сладкое варьировала от 0,4 мг С/м² в середине марта до 149,8 мг С/м² в середине сентября, в оз. Еловое – от 1,9 мг С/м² в конце марта до 57,4 мг С/м² в конце августа. В сезонной динамике биомассы фитопланктона в 2021 г. в оз. Кисло-Сладкое отмечены летнее и осеннее увеличение биомассы, в оз. Еловое – весеннее, летнее и осеннее увеличение биомассы. В оз. Еловое летний и осенний максимумы биомассы были ниже соответствующих максимумов в оз. Кисло-Сладкое.

Выявлены различия в типе питания фитопланктона двух озер весной: в оз. Кисло-Сладкое преобладали автотрофные формы, в оз. Еловое – гетеротрофные. Летом и осенью смена форм шла

по характерной для Белого моря схеме: в июне-июле в фитопланктоне обоих озер преобладали автотрофные формы, затем до конца вегетационного сезона – гетеротрофные.

Слоистая структура в вертикальном распределении фитопланктона в 2021 г. была более выражена в оз. Еловое по сравнению с оз. Кисло-Сладкое. Наибольшая биомасса водорослей в озерах, за небольшим исключением, была отмечена над границей с сероводородной зоной в течение всего периода исследования.

Статистический анализ сходства фитопланктона двух озер показал, что большинство проб достоверно объединяются в четыре группы, которые различаются на 91% и выше. Группа I включает пробы подледного фитопланктона из оз. Кисло-Сладкое с характерными видами *Microcystis ichthyoblabe*, *Amphora* sp. и криптомонадами; группа II – пробы преимущественно верхних горизонтов из оз. Кисло-Сладкое в мае-августе с характерными видами *Cyclotella choctawhatcheeana* и *M. ichthyoblabe*; группа III – большинство проб из оз. Еловое с характерными видами *Gyrosigma obscurum*, *Melosira nummuloides* и *Desmodesmus armatus*; группа IV – пробы, ассоциированные с хемоклином обоих озер с характерным видом *Oxyrrhis marina*.

Таким образом, динамика обилия, видового состава и типа питания фитопланктона в оз. Кисло-Сладкое и оз. Еловое значительно отличались друг от друга в начале вегетационного периода, что в большей мере обусловлено разной продолжительностью стратификации озер, структурой льда зимой и морфологией водосбора. Но за счет более интенсивного развития организмов, приуроченных к хемоклину как наиболее продуктивному слою, к концу сезона сформировалось типичное для обоих озер сообщество с характерным видом *O. marina*.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-24-00008.

Список литературы

- 1) Краснова Е.Д. и др. К инвентаризации реликтовых водоемов, отделяющихся от Белого моря // Труды Беломорской биостанции МГУ. 2016. Т. 12. С. 211-241.
- 2) Hillebrand H. et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae // Journal of phycology. 1999. Vol. 35. № 2. P. 403-424.
- 3) Menden-Deuer, S., Lessard, E.J. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms, and other protist plankton // Limnol. Oceanogr. 2000. Vol. 45. № 3. P. 569-579.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ МОРФО-АНАТОМИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ И ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИИ АРКТИЧЕСКОЙ АКТИНИИ *HALCAMPRA ARCTICA* CARLGREN, 1893 (HALCAMPIDAE, ACTINIARIA, ANTHOZOA, CNIDARIA)

Иванова Н.Ю.

Зоологический институт РАН, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Actiniaria, Halcampidae, Halcampa arctica, зарывающиеся актинии, морфология, анатомия, изменчивость признаков, таксономически значимые признаки.

Актинии представляют собой довольно сложную в изучении группу беспозвоночных животных, поскольку в процессе фиксации их тело, состоящее исключительно из мягких тканей, сильно деформируется, теряется его прижизненная окраска, а также утрачиваются или видоизменяются морфо-анатомические признаки. Такие негативные последствия действия фиксирующей жидкости затрудняют процесс идентификации материала и описание новых видов, поскольку необходимо установить, какие признаки таксономически значимы, а какие являются результатом фиксации. Кроме того, процесс идентификации осложняют нередко недостаточно информативные и лишенные подробных иллюстраций описания, основанные на изучении малого числа экземпляров и опубликованные в прошлых столетиях. Тем не менее, проследить изменчивость черт строения и выявить таксономически значимые признаки актиний позволяет исследование многих экземпляров и анализ подводных фотографий живых актиний.

Цель настоящего исследования – выяснить степень изменчивости морфо-анатомических признаков и оценить их таксономическую значимость на примере арктической зарывающейся актинии *Halcampa arctica* Carlgren, 1893.

В результате изучения более 100 фиксированных экземпляров было обнаружено, что этот вид характеризуется высокой изменчивостью морфо-анатомических признаков, вызванной действием фиксирующей жидкости, а также возрастом исследуемых животных и их индивидуальным развитием. К примеру, щупальца фиксированных экземпляров варьируют от коротких до длинных, покрыты поперечными, продольными или разнонаправленными морщинками. Скапулюс может нести продольные гребни, покрыт кольцевыми складками или его поверхность вовсе гладкая. Анализ цветных фотографий живых актиний, сделанных вовремя водолазных работ в прибрежных водах архипелага Земля Франца-Иосифа, показал, что в живом непотревоженном состоянии щупальца *H. arctica* длинные с гладкой поверхностью, а стенка скапулюса лишена каких-либо структур, тонкая, и сквозь нее видны вставки мезентериев. Было выявлено, что кутикула довольно легко утрачивается вместе с песчинками, поэтому у фиксированных экземпляров сохраняется довольно редко. Кроме того, значительно варьирует форма тенакулей: от высоких сосочков до углублений в стенке скапулуса.

Серии гистологических срезов показали, что второй цикл мезентериев закладывается у *H. arctica* в проксимальной части тела; мускулатура мезентериев более развита в средней и проксимальной части. Мезентерии ювенильных и молодых особей несут удлиненные и ограниченные продольные мускулы-ретракторы с 20–25 мышечными отростками, тогда как мезентерии взрослых экземпляров имеют более сильные ретракторы с длинным мезоглеальным выростом в его наружной части и часто с крупными мезоглеальными отростками в его основной части. Париетальные мускулы обычно удлиненные, но нередко встречаются округлые, при этом один экземпляр может иметь одновременно разные формы этого типа мышц. При исследовании *H. arctica* были обнаружены особи, у которых на всем протяжении мезентериев располагались многочисленные стомы округлой формы. Пока остается не ясным значение такого большого числа стом, поскольку

в настоящее время почти у всех описанных видов актиний на мезентериях одновременно могут присутствовать лишь два отверстия: оральная и маргинальная стомы.

Подводные фотографии *Halccampa arctica* показывают, что актинии этого вида зарываются в мягкий грунт и живут большими группами, часто состоящими из особей разных возрастов. Интересно, что маленькие, вероятно, ювенильные особи сидят очень близко, иногда почти в одной норке, с крупными взрослыми особями. Основываясь на этом, их можно рассматривать как материнскую особь с потомством. На собранном материале, однако, не было подтверждено наличие вынашивания. Возможно, размножение *H. arctica* происходит как у *Halccampa duodecimcirrata*, которая лишена способности к распространению посредством пелагической личинки, и ее потомство не покидает своего места рождения [1]. Кроме того, подводные фотографии показывают, что полипы *Halccampa arctica* свободно сосуществуют с различными бентосными организмами, но некоторые из них служат добычей для этой актинии. Так, в гастральной полости одного из экземпляров были обнаружены щетинки полихеты, принадлежащей к роду *Harmothoe* Kinberg, 1856, в полости других полипов были найдены обрывки скелетов ракообразных.

Таким образом, исследование показало, что часть внешних признаков *Halccampa arctica* не может служить в качестве диагностических, так как их проявление у особей выражено в разной степени из-за действия фиксатора. Структура мускулов-ретракторов усложняется с возрастом животного, в связи с этим, описанный Карлгреном экземпляр под названием *Halccampa vega* Carlgren, 1921, вероятно, является лишь взрослой половозрелой особью *H. arctica*, но не другим видом. Кроме того, изучение многих особей позволило обнаружить новый диагностический признак *H. arctica* – многочисленные или редкие стомы, располагающиеся в центральной части пластины мезентерия. Анализ подводных фотографий актиний в естественной среде позволил получить новые данные о биологии этого вида.

Исследование выполнено в рамках государственного задания «Таксономия, биоразнообразие и экология беспозвоночных российских и сопредельных вод Мирового океана, континентальных водоёмов и увлажнённых территорий» №122031100275-4.

Список литературы

- 1) Nyholm K.-G. On the development and dispersal of *Athenaria actinia* with special reference to *Halccampa duodecimcirrata*, M. Sars // *Zoologiska Bidrag Uppsala* № 27. 1949. P.467–505

ВКЛАД ПЛАНКТОННОЙ БИОТЫ В ГОДОВОЙ ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ПОТОК ВЗВЕШЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА НА ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ

Карманов В.А., Сергеева В.М., Дриц А.В., Кравчишина М.Д.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук*

Ключевые слова: седиментация, осадконакопление, органический углерод

Ключевая роль Карского моря для всей арктической экосистемы обусловлена наибольшим материковым стоком во всем Арктическом бассейне. Годовой объем пресной воды, поступающей в Карское море из рек Обь и Енисей, составляет более 40% от всего речного стока в Арктике [1]. На шельфе Карского моря происходит геохимическая и биологическая трансформация аллохтонного вещества. Поскольку речной сток является важнейшим фактором, определяющим состав осадочного вещества (ОВ) и интенсивность процессов седиментации [2], можно предположить, что в Карском море количественные параметры вертикального потока ОВ могут иметь специфический характер.

Хотя Карское море является относительно хорошо исследованным районом, лишь небольшое количество работ посвящено вертикальным потокам ОВ [3, 4, 5,], и их пространственная изменчивость остается малоизученной. В связи с этим целью работы было исследование вертикальных потоков ОВ на шельфе Карского моря по материалам годовых малых седиментационных ловушек «МСЛ-110». Получение подобных данных может иметь значение при анализе влияния изменений климата в Арктике.

Работы по постановке и снятию ловушки проводили в ходе экспедиций НИС «АМК» в 2020 и 2021гг. на внешнем шельфе Карского моря (75.7° с.ш., 72.2° в.д.). Седиментационная ловушка представляла собой спаренные цилиндры площадью входного отверстия 0,0095м² с ёмкостями в нижней части с фиксирующим раствором HgCl₂ (1%). Ловушки были установлены на двух горизонтах: 70м и 150м, при общей глубине 170м. Анализ спутниковых данных AMSR-E и AMSR2 арктического портала (<http://siows.solab.rshu.ru/>) показал, что район был полностью покрыт льдом с середины декабря 2020г до конца июня 2021г. Вертикальное зондирование перед постановкой ловушки при помощи комплекса SBE911p/SBE-32 показало, что этот район находился под влиянием речного стока (солёность в поверхностном слое была около 14). В пробах ловушек оценивалось общее количество ОВ, содержание взвешенного органического углерода, Si и Al, а так же количество и содержание углерода в фекальных пеллетах и фитопланктоне. Измерение углерода согласно методике на анализаторе углерода Shimadzu TOC-VCPH [6].

В результате были получены оценки годовых вертикальных потоков ОВ, органического углерода (ВОУ), кремния, алюминия и частиц планктонного происхождения (фекальных пеллет (ФП) и фитопланктона). Анализ материала ловушек показал заметные различия потока ОВ и его компонентов на разных глубинах. На глубине 70м величины годовых потоков ОВ, ВОУ, кремния, алюминия, составляли 341г/м², 12гС/м², 80 г/м², 25 г/м². На 150м значения соответствующих параметров составляли 864г/м², 24 гС/м², 206 г/м², 65 г/м². Поток автохтонного ВОУ изменялся от 7гС/м²/год на 70м до 13гС/м²/год на 150м. Вклад фекальных пеллет в поток автохтонного ВОУ составлял 4-6%. Вклад фитопланктона в вертикальный поток автохтонного ВОУ был значительно выше на 70 м и составлял 24.5%, на 150 м он не превышал 4.3%.

Полученные результаты подтверждают значительную роль речного стока в процессах седиментации [5] даже на внешнем шельфе Карского моря. Кроме того, заметное увеличение потока ОВ в придонном горизонте может свидетельствовать о влиянии латерального переноса ОВ на

количественные параметры вертикального потока. Вклад планктонной биоты в вертикальный поток автохтонного ВООУ был в 2.8 раз выше на 70 м за счет фитопланктонной составляющей по сравнению с придонным горизонтом, и составлял 28% на 70 м и 10% на 150 м.

Исследование выполнено по теме госзадания FMWE-2024-0021.

Список литературы

- 1) Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // *Am. J. Sci.* 1996. V. 296. P. 664–691.
- 2) Дриц А.В., Пастернак А.Ф., Кравчишина М.Д. и др. Роль планктона в вертикальном потоке вещества на шельфе Восточно-Сибирского моря: влияние стока р. Индигирки // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 746–754.
- 3) Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Суханова И. Н., Беляев Н. А., Карманов В. А., Флинт М.В. Сезонная изменчивость потока осадочного вещества на шельфе северной части Карского моря © 2021.
- 4) Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др. Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // *Океанология*. 1994. Т. 34. № 5. С. 748–758.
- 5) Gaye-Haake B., Unger D., Nothig E.-M. et al. Particle fluxes from short-term sediment trap deployments in late summer in the southern Kara Sea // *Siberian River Run-off in the Kara Sea: Characterization, Quantification, Variability, and Environmental Significance* / Eds. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 309–328.
- 6) Дриц А. В., Беляев Н. А., Карманов В. А., Флинт М. В.. Применение метода высокотемпературного сжигания для измерения содержания органического углерода в мелкоразмерном (≤ 1 мм) зоопланктоне и фекальных пеллетах // *ОКЕАНОЛОГИЯ*, 2023, том 63, № 1, с. 160–168

ТРОФИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ В СООБЩЕСТВЕ ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ КАРСКОГО МОРЯ ПОСЛЕ ВСЕЛЕНИЯ КРАБА-СТРИГУНА *CHIONOECETES OPILIO*

Киселев А.Д.^{1,2}, Залота А.К.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, г. Москва

²Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: краб-стригун *Chionoecetes opilio*, Карское море, инвазия, трофическая ниша, спектр питания, трофическая сеть.

Краб-стригун, *Chionoecetes opilio*, впервые обнаружен в Карском море в 2012 г. [1]. Краб-стригун проник в Карское море в результате распространения инвазивной популяции из Баренцева моря. Ранее в Карском море практически не было крупных бентосных хищников, а также здесь не известно потенциальных хищников, охотящихся на краба-стригуна (за исключением самого краба). В результате, инвазия краба-стригуна привела к изменениям сообществ макробентоса [2], что не могло не отразиться на трофических взаимосвязях в сообществах Карского моря.

Для исследования в качестве модельного полигона был выбран залив Благополучия в связи с хорошей изученностью и наличием данных многолетнего мониторинга, также в заливе Благополучия начиная с 2016 г. наблюдается самая высокая плотность поселения краба-стригуна в Карском море [3]. Целью работы стала оценка влияния краба-стригуна на взаимосвязи в трофической сети сообщества залива Благополучия.

Для построения трофических сетей использовались литературные данные о питании массовых видов в заливе Благополучия (по сборам 2022 г.). Литературные данные искали в поисковой системе Google scholar, для каждого вида по трем запросам «питание», «feeding», «diet» просматривались первые 20 результатов. Литературные данные дополнялись нашими сведениями о содержимом желудка краба-стригуна, а также анализа стабильных изотопов в тканях массовых видов.

Материал собран на двух станциях в заливе Благополучия в 2018, 2020 и 2022 г. Содержимое желудков крабов проанализировано по методике Буруковского [4]: пищевые компоненты определялись визуально до класса или отряда; определялась частота встречаемости пищевых компонентов в желудках; дополнительно для полных желудков рассчитывался виртуальный (средний) пищевой комок. Анализ стабильных изотопов углерода и азота в тканях массовых видов проводился на масс-спектрометре Thermo Delta V Plus и элементном анализаторе Thermo Flash 1112.

Литературные данные о питании найдены для 41 вида на основании 156 источников. Суммарно проанализировано содержимое 153 желудков. Изучен изотопный состав тканей 63 видов.

В трофической сети залива Благополучия наблюдается большая доля хищных бентосных беспозвоночных видов. Данные анализа стабильных изотопов позволили выделить в заливе Благополучия бентосную и пелагические цепи, различающиеся по источникам питания. Бентосные виды по показателям углерода близки к макрофитам, а пелагические – к фитопланктону.

По данным анализа стабильных изотопов краб-стригун в разные года находится в центре пищевой сети залива Благополучия на одном трофическом уровне с падальщиками (например *Eualis gaimardii*, *Scoletoma fragilis*) и мелкими хищниками (*Micronephthys minuta*). Анализ содержимого желудков краба-стригуна показывает преобладание детрита, растительных компонентов, офиур или двустворчатых моллюсков (в разные годы) по частоте встречаемости, также в желудках часто встречались минеральные компоненты (песок или камни). Большой вклад в виртуальный (средний) пищевой комок вносит детрит. Такое содержимое пищевого комка необычно для краба-стригуна, по сравнению с литературными данными по другим регионам. Вероятно, в условиях

обедненных бентосных сообществ Карского моря краб-стригун использует все доступные источники пищи. В результате, питание детритом и растительными остатками понижает трофический уровень краба-стригуна относительно основных хищников.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФ №23-24-00440.

Список литературы

- 1) Zimina O.L. Finding the snow crab *Chionoecetes opilio* (O Fabricius 1788) (Decapoda Majidae) in the Kara Sea // *Russian Journal of Marine Biology*. 2014. V. 40. № 6. С. 490–492.
- 2) Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В. Изменения донных сообществ центральной части Карского моря в результате вселения краба-стригуна *Chionoecetes opilio* // *Морские исследования и образование (MARESEDU)*. 2022. С. 320–324.
- 3) Zalota A.K., Spiridonov V.A., Galkin S., Pronin A.A. Population structure of alien snow crabs *Chionoecetes opilio* in the Kara Sea (trawl and video sampling) // *Oceanology*. 2020. V. 60. № 1. С. 83–88.
- 4) Буруковский Р.Н. Креветки: Состав пищи и пищевые взаимоотношения. СПб.: Проспект Науки. 2022. 568 с.

ДАННЫЕ О ВСТРЕЧАЕМОСТИ И БИОЛОГИИ ЗАПРОРЫ *ZAPRORA SILENUS* В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА И ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ

Колобухова М.Д.¹, Курнос Д.С.²

¹ Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Петровский колледж», г. Санкт-Петербург

² Тихоокеанский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Владивосток

Ключевые слова: Тихий океан, Берингово море, запрора

Запрора *Zaprora silenus* – единственный представитель эндемичного северотихоокеанского семейства *Zarrogidae*, ареал которого простирается широкой дугой от Калифорнии до тихоокеанских вод Японии [1,2,3]. Основной областью обитания запроры являются придонные воды нижней части шельфа и верхней зоны материкового склона [1,2]. Считается, что молодь длиной до 8 см обитает в шельфовой зоне, запрора до 50 см держится в пелагиали или батииали, а взрослые особи опускаются в придонные слои на глубинах 20-550 м, где могут достигать длины до 1 м [1]. В настоящее время сведений о ее встречаемости и биологии в открытых водах северной части Тихого океана и Берингова моря крайне мало.

Материал для данного исследования был собран во время проведения летне-осенних экспедиций на НИС «ТИНРО» и НИС «Профессор Кагановский» в северо-западной части Тихого океана и Беринговом море в 2023 г. Всего было выполнено 95 тралений в Тихом океане с 1 июня по 7 июля, и 72 траления в Беринговом море с 24 сентября по 4 октября. В течение рейса все траловые работы выполнялись в верхней эпипелагиали (0-30 м), траления продолжительностью 1 час выполнялись круглосуточно.

В северо-западной части Тихого океана запрора *Zaprora silenus* встречалась почти на всем ареале исследования. Уловы варьировали от 1 до 3 экземпляров за траление, в диапазоне температур от +4 до +12 °С. Встречаемость вида составила 20% (встретилась в 21 тралении из 95), как в светлое, так и в темное время суток. Основные уловы наблюдались над глубинами 5000 – 5500 м. Размерный состав особей данного вида был представлен в диапазоне от 17 до 33 см, с модальной группой в диапазоне 26-27 см.

В западной части Берингова моря запрора также встречалась почти на всем ареале исследования, но основные уловы наблюдались на шельфовой зоне. Встречаемость вида составила 48% (встретилась в 33 тралах из 68). Уловы колебались в пределах от 1 до 21 экз./час на результативное траление в диапазоне температур от +7 до +11,5 °С. Размерный состав особей данного вида был представлен в диапазоне от 8 до 33 см, с модальной группой в диапазоне 14-17 см.

По данным других исследователей [2] запрора питается сцифоидными медузами. Обладая большим ртом с режущими однорядными зубами на челюстях, она способна откусывать края зонтиков и у крупных особей медуз. В каждом из уловов запроры также отмечались массовые виды медуз (*Chrysaora melonaster*, *Phacellophora camtshchatica*, *Aequorea* sp.).

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что молодые особи запроры, являясь активными хищниками, могут далеко мигрировать в открытые воды Тихого океана и Берингова моря в поисках пищи. Так как глубины, над которыми отмечались поимки, превышают глубины обитания взрослых особей, можно предположить, что перед переходом на придонный образ жизни запрора совершает обратную миграцию к шельфовым зонам.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»).

Список литературы

- 1) Кодолов Л.С. Определитель массовых видов рыб дальневосточных морей России // Владивосток: ТИНРО. 1994. 109 с.
- 2) Токранов А.М. Некоторые черты биологии запроры *Zaprora silenus* в Тихоокеанских водах северных Курильских островов и юго-восточной Камчатки // Вопросы ихтиологии. Т. 39. № 4. 1999. С. 573-576.
- 3) Smith K.R., Somerton D.A., Yang M.-S., Nichol D.G. Distribution and biology of prowfish (*Zaprora silenus*) in the northeast Pacific // U.S. Fish. Bull. V. 102. № 1. 2004. P. 168-178.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ОСОБЕННОСТИ МИГРАЦИЙ СЕЛЬДЕВОЙ АКУЛЫ *LAMNA DITROPIS* В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Курносков Д.С., Ерулина А.О.

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»)

Ключевые слова: Тихий океан, сельдевая акула, *Lamna ditropis*, миграции.

Тихоокеанская сельдевая акула *Lamna ditropis* широко распространена в пелагических водах северной Пацифики. С 2016 года в районе северо-западной части Тихого океана наблюдается резкое увеличение ее численности. Сельдевая акула является высшим хищником с широким ареалом, основу ее рациона составляют ценные и массовые виды (лососевые, сардина, сельдь, кальмар). В настоящее время ее биология и особенности сезонного распределения остаются недостаточно изученными, ее исследования в основном сосредоточены вдоль побережий северной части Тихого океана. Последняя работа, посвященная ее сезонным распределениям издана в 1993 году [1]. Наибольшее число работ посвящено питанию сельдевой акулы в заливе Аляска [2,3].

Понимание моделей миграции и динамики численности сельдевых акул позволит лучше понять их влияние на экосистему в северной части Тихого океана, ведь из-за своего высокого трофического уровня акула может способствовать ее значительным изменениям.

Материал для данного исследования был собран во время проведения научных и промысловых экспедиций с 1970 по 2021 гг. (база данных Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» (ТИНРО)).

В результате исследований у сельдевой акулы в северо-западной части Тихого океана отмечается разделение по размеру. Особи сельдевой акулы до 140 см встречаются только в прибрежных тихоокеанских водах островов Хонсю и Хоккайдо и не севернее вод течения Ойасио. Вероятно, в этом районе происходит рождение и нагул молодых акул до наступления половой зрелости (140-170 см), в этот период акулы не совершают длинных миграций. Взрослые акулы (170-280 см) распространены широко по северной Пацифике от 31° с.ш до северной границы Берингова моря.

Годовой цикл сельдевой акулы можно представить следующим образом: в зимний период акулы концентрируются в тихоокеанских водах острова Хонсю в пределах 38° - 35° с.ш. где вероятно происходит их размножение. Весной акулы начинают мигрировать к северу. В летний период увеличивается встречаемость акул в умеренных водах, они мигрируют в Японское и Охотское моря, концентрируются в заливе Аляска. В августе и сентябре отмечаются самые северные поимки акул у границ Берингова и Чукотского морей. Но при этом высокой остается концентрация акул и в тихоокеанских водах южных Курильских островов. Осенью происходит обратная миграция с севера на юг.

Изучив распределение сельдевой акулы за последние 6 лет, видно, что на ее сезонные миграции и численность сильное влияние оказывает дальневосточная сардина *Sardinops melanostictus* – массовая промысловая эпипелагическая рыба субтропического комплекса. Она известна своей способностью к значительным флуктуациям численности и связанным с этим расширением или сокращением области обитания. Прошлая вспышка численности была отмечена в 80-х годах XX века, наблюдаемая сейчас началась в 2016 году и продолжается в настоящее время. В летнее время сардина массово нагуливается в тихоокеанских водах южно-курильских островов, где ее активно поедает сельдевая акула. С появлением сардины в этом районе, частота встречаемости сельдевой акулы выросла несколько раз. Подобные концентрации высшего хищника влияют на баланс пищевой цепи северо-западной части Тихого океана.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»).

Список литературы

- 1) Благодаров А. И. Сезонное распределение и некоторые черты биологии сельдевой акулы (*Lamna ditropis*) в северо-западной части Тихого океана // *Вопр. ихтиологии*. Т. 33, № 5. 1993. С. 715-719.
- 2) Thomas A Okey, Bruce A Wright, Michael Y Brubaker. Salmon shark connections: North Pacific climate change, indirect fisheries effects, or just variability? // *Fish and fisheries*. V.8. I. 4. 2011. P. 256-272.
- 3) Andrew C. Seitz, Michael B. Courtney, Mark D. Evans, and Kaitlyn Manishin. Pop-up satellite archival tags reveal evidence of intense predation on large immature Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) in the North Pacific Ocean // *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. V 76. № 9. 2019.

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ ПО ФАУНЕ КУМОВЫХ РАКОВ (CRUSTACEA: CUMACEA)
ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ВЫХОДОВ И ХОЛОДНЫХ ВЫСАЧИВАНИЙ В
БЕРИНГОВОМ МОРЕ (ПО ДАННЫМ 82 РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК М.А.
ЛАВРЕНТЬЕВ»)

Лаврентьева А.В.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток

Ключевые слова: Сумасеа, бентос, глубоководная фауна, гидротермальные выходы, холодные высачивания, метановые выходы.

Кумовые раки (Cumacea) это отряд высших раков, надотряда Peracarida, которые являются одной из доминирующих групп макробентоса. Мировая фауна кумовых раков включает около 1900 описанных видов, обитающих во всех океанах, от литоральной зоны до глубоководных желобов.

Экосистемы гидротермальных выходов и холодных высачиваний (сипов) были открыты в 1977 и 1983 годах соответственно. Первое упоминание о кумовых раках района метановых выходов встречается в работе Левин с соавторами [4], и с тех пор 12 видов кумовых были найдены в районах холодных просачиваний. Первые данные о кумовых раках гидротермальных источников были опубликованы в работе Корбера с соавторами [2] и к настоящему времени известно 7 видов кумовых раков, встречающихся в гидротермальных районах.

Глубоководные гидротермальные выходы в Беринговом море впервые были обнаружены в 1986 г., в 26-м рейсе НИС «Вулканолог», на южной вершине подводного вулкана Пийпа. Сообщества метановых просачиваний на Корякском склоне в Беринговом море на глубинах от 400 до 695 м были обнаружены в 2018 году, во время 82-го рейса судна "Академик М.А. Лаврентьев" и на сегодняшний день являются самыми северными в Тихом океане глубоководными экосистемами, основанными на хемосинтезе [1].

В ходе 82 рейса НИС «Академик М.А. Лаврентьев» при помощи ТНПА «Команч-18» была изучена донная фауна на двух полигонах Берингова моря: в районе гидротермальных проявлений вулкана Пийпа и в области холодных высачиваний Чукотского склона.

В районе вулкана Пийпа было собрано 3 представителя отряда Cumacea, принадлежащие двум видам родов *Leucon* и *Eudorella* из семейства Leuconidae.

В районе метановых выходов фауна кумовых раков представлена девятью видами из шести родов (*Eudorella*, *Leucon*, *Eudorellopsis*, *Cumella*?, *Campylaspis*, *Vaunthompsonia*) и трех семейств (Leuconidae, Nannastacidae, Bodotriidae).

Только один вид, *Leucon* sp. 1, был собран и в гидротермальных, и в сиповых районах.

Описанная ранее фауна кумовых раков российских вод Берингова моря представлена 33 видами из 13 родов и 5 семейств [5]. Ни один из собранных нами кумовых раков, не был известен ранее в Беринговом море, вероятно большинство из обнаруженных видов являются новыми для науки. Род *Vaunthompsonia*, два вида из которого найдены нами в области холодных высачиваний Чукотского склона, впервые отмечен для Берингова моря.

Все обнаруженные виды принадлежат к трем эволюционно более молодым семействам кумовых раков (Leuconidae, Nannastacidae, Bodotriidae). Это согласуется с нашими предыдущими исследованиями, в которых отмечено что заселение батииали и псевдоабиссали Японского моря, происходило преимущественно за счет эволюционно более молодых групп кумовых раков, так же как и в целом, заселение абиссальных глубин Мирового океана. Однако, в работе Левин с соавторами [4], указано, что на шельфе (35-50 м) северной Калифорнии виды семейств Diastylidae и Lamproridae, то есть наоборот, представители более древней группы кумовых раков, были обнаружены в осадках как сиповых, так и не-сиповых районов, и при этом большей численности

достигали в районах метановых выходов. В том же районе, но на батимальных глубинах (500-525 м) встречены виды семейств Nannastacidae и Bodotriidae [4]. Похоже, что на надвидовом уровне состав фауны кумовых раков определяется больше глубиной, чем принадлежностью к восстановительному биотопу. На данный момент описан только один эндемичный для гидротермальных выходов род *Thalycrocuma* (Nannastacidae). Левин с соавторами [4] отмечают, что многие представители инфауны, обитающие в районах холодных высачиваний, не эндемичны, а являются представителями фоновой фауны этого района, адаптированными к восстановительным биотопам. Корбера с соавтором [3] предполагают, что заселение глубоководных гидротерм происходило разными путями – часть фауны фоновых районов смогла приспособиться к гидротермальным условиям окружающей среды, а часть видов прибыла из соседних восстановительных биотопов. Батимальная фауна кумовых раков Берингова моря практически не изучена, поэтому вероятно, что при дальнейшем изучении бентоса, некоторые виды, обнаруженные нами в восстановительных биотопах, будут также найдены и в фоновых сообществах.

Экспедиционные исследования были проведены при финансовой поддержке ФАНО (целевое финансирование на проведение морских экспедиционных исследований). Данная работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 1021062912508-7 «Биоразнообразие Мирового океана: таксономия и эволюция, репродуктивная биология, биогеография и биоинвазии».

Список литературы

- 1) Галкин С.В., Мордухович В.В., Крылова Е.М. и др. Исследования экосистем гидротермальных выходов и холодных высачиваний в Беринговом море (82-й рейс научно-исследовательского судна “Академик М.А. Лаврентьев”) // Океанология. 2019. Т. 59. № 4. С. 95–98.
- 2) Corbera J. Arthropoda, Crustacea, Cumacea // Handbook of deep-sea hydrothermal vent fauna. / ed. Segonzac M., Bright M. Denisia. 2006. V. 18. 370 p.
- 3) Corbera J., Segonzac M. A new Styloptocuma species (Crustacea, Cumacea) from hydrothermal vent fields of the Lau and North Fiji basins (West Pacific) // Zoosystema. 2010. V. 32. № 3. P. 439–447.
- 4) Levin L.A., James D.W., Martin C.M. et al. Do methane seeps support distinct macrofaunal assemblages? Observations on community structure and nutrition from the northern California slope and shelf // Marine Ecology Progress Series. 2000. V. 208. P. 21–39.
- 5) Petryashov V.V., Vassilenko S.V., Tzareva L.A. Order Cumacea // Check-list of species of free-living invertebrates of the Russian Far Eastern seas / ed. B.I. Sirenko. St. Petersburg: Zoological Institute RAS, 2013. P. 139–140.

ПРОДУКЦИЯ АКТИВНЫХ ФОРМ КИСЛОРОДА И МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МИТОХОНДРИЙ В ГЕМОЦИТАХ МОРСКОГО ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА *ANADARA KAGOSHIMENSIS* В УСЛОВИЯХ ГИПООСМОТИЧЕСКОГО СТРЕССА

Лавриченко Д.С., Челебиева Э.С., Кладченко Е.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр
"Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН"

Ключевые слова: гипоосмотический стресс, гемоциты, активные формы кислорода, мембранный потенциал митохондрий, регуляторное снижение объема.

Anadara kagoshimesis (Tokunaga, 1906) – двустворчатый моллюск, который обитает в регионах с соленостью от 10-11 ‰ до 30 ‰, в том числе и литоральной и сублиторальной зоне, подверженной периодическому изменению солености [1]. Как и все двустворчатые моллюски, анадара принадлежит к осмоконформерам, их адаптация к изменению солености происходит за счет клеточных механизмов регуляции. В частности, адаптация к низкой солености происходит за счет регуляторного снижения объема - (regulatory volume decrease, RVD). Регуляция объема гемоцитов – энергозатратный процесс. Исследования показывают, что стресс, вызванный снижением солености окружающей среды, отрицательно влияет на функциональную активность митохондрий, что приводит к снижению активности транспорта электронов, увеличению митохондриальных активных форм кислорода (АФК). В связи с этим целью данной работы было определение комплекса электрон-транспортной цепи митохондрий, являющегося основным источником АФК в гемоцитах *A. kagoshimensis* и исследование динамики изменения уровня АФК и мембранного потенциала митохондрий в процессе активации RVD в гипоосмотических условиях.

Взрослые особи *A. kagoshimensis* были собраны на марикультурной ферме возле Севастопольской бухты в апреле 2023 г. (температура воды 15-18 °С, соленость – 16-18 ‰). Для снятия стресса после транспортировки моллюски находились в аквариумах на протяжении недели, условия были приближены к естественной среде обитания. Гемолимфу отбирали шприцом из приводящей мышцы, после чего трижды центрифугировали (5 минут, 10 °С, 350 g) и использовали для дальнейшего *in vitro* эксперимента. Определение участия различных внутриклеточных источников АФК проводили с помощью химических ингибиторов мембранных комплексов: rotenone (ингибитор комплекса I), azide (ингибитор комплекса II), S3QEL (ингибитор комплекса III). Для сравнения использовалась контрольная группа (без использования ингибиторов). Разбавленную гемолимфу (1:4 в фильтрованной стерильной морской воде) инкубировали с химическими ингибиторами и соответствующими флуоресцентными зондами в течение 30 минут при 4 °С в темноте. После инкубации образцы хранили на льду до проведения анализа методом проточной цитометрии и лазерной дифракции. Моделирование гипоосмотического стресса происходило путем снижения осмолярности с $460,0 \pm 2,0$ мОсм л⁻¹ до $216,0 \pm 4,0$ мОсм л⁻¹. После инициации реакции RVD при помощи лазерного анализатора частиц в течении 40 минут фиксировали следующие показатели: АФК и мембранный потенциал митохондрий. Для оценки спонтанной продукции АФК использовался краситель 2-7-дихлорфлуоресцеин-диацетат (DCF-DA). 10 мкл красителя добавляли в 1 мл суспензии клеток, инкубировали в течение 30 минут, после чего отмывали 3 раза. Мембранный потенциал митохондрий изучался с помощью красителя Rhodamine123, окрашиваясь по аналогичному протоколу.

Для определения статистически значимых результатов использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни.

Для выявления основного источника АФК мы оценили уровень продукции АФК в контрольной группе и с применением различных ингибиторов митохондриальных комплексов при помощи

метода проточной цитометрии. Результаты работы показывают, что инкубация с такими ингибиторами, как Rotenone (ингибитор комплекса I) и Azide (ингибитор комплекса II), не повлияла на продукцию. В то время, как S3QEL (ингибитор комплекса III) снизил данный показатель в 3 раза ($p < 0,01$), по сравнению с контрольным уровнем. Аналогичный результат получен для *Magallana gigas* при воздействии на гемоциты другим ингибитором комплекса III - антимицина А [2]. Результаты подтверждают, что в гемоцитах *A. kagoshimensis* основным источником АФК является комплекс III цепи митохондрий.

Для изучения динамики изменения уровня АФК и мембранного потенциала митохондрий после инициации RVD мы снижали осмолярность среды с $460,0 \pm 2,0$ мОсм л⁻¹ до $216,0 \pm 4,0$ мОсм л⁻¹, что вызвало резкое набухание клеток. В контрольной группе максимальный клеточный объем гемоцитов составлял $173,7 \pm 8,3$ % относительно физиологической осмолярности анадары ($460,0 \pm 2,0$ мОсм л⁻¹). После чего объем гемоцитов постепенно снижался в течение 30 минут достигая значения $134,5 \pm 8,3$ %. Ингибирование митохондриальных комплексов не оказало влияния на процесс восстановления клеточного объема в гипоосмотических условиях. Увеличение объема гемоцитов *A. kagoshimensis* не сопровождалось изменением мембранного потенциала митохондрий в контрольной группе, а также при ингибиторах Azide и S3QEL. Набухание гемоцитов сопровождалось небольшим (в 0,55 раз) увеличением потенциала в присутствии ингибитора Rotenone ($p < 0,01$), после чего показатель постепенно снижался (в 0,71 раз). В то время, как изменение осмолярности влияло на снижение продукции АФК (в 0,3 раза) только в присутствии ингибитора S3QEL ($p < 0,01$). По истечению времени записи (30 минут) уровень продукции снизился во всех группах.

Таким образом наше исследование подтвердило, что основным источником АФК в гемоцитах анадары, как и у других видов моллюсков является митохондриальный комплекс III. Наличие ингибиторов не влияло на динамику RVD в гипоосмотических условиях, однако изменения уровня АФК и мембранного потенциала митохондрий были ассоциированы как осмотическим набуханием клеток, так и воздействием ингибиторов Rotenone и S3QEL.

Работа выполнена в рамках госзадания 121102500161-4 «Закономерности организации иммунной системы промысловых гидробионтов и исследование влияния факторов внешней среды на функционирование их защитных систем».

Список литературы

- 1) Bañón, R., Fernández, J., Trigo, J. E., Pérez-Dieste, J., Barros-García, D., & De Carlos, A. (2015). Range expansion, biometric features and molecular identification of the exotic ark shell *Anadara kagoshimensis* from Galician waters, NW Spain. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 95(3), 545-550.
- 2) Donaghy, L., Kraffe, E., Le Goïc, N., Lambert, C., Volety, A. K., & Soudant, P. Reactive oxygen species in unstimulated hemocytes of the pacific oyster *Crassostrea gigas*: a mitochondrial involvement // *PLoS ONE*. – 2012. – Vol. 7. – №. 10. – P. e46594.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КРЕМНИЯ НА СТРУКТУРУ ФИТОПЛАНКТОННОГО СООБЩЕСТВА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

Лифанчук А.В., Микаэлян А.С., Мошаров С.А., Очередник О.А., Силкин В.А., Федоров А.В.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: кремний, диатомовые водоросли, Черное море, флуоресценция

Северо-восточная часть Черного моря характеризуется сезонной динамикой смены доминирующих видов фитопланктона. Весной доминируют мелкоклеточные диатомеи, в конце весны - начале лета – кокколитофориды, с середины июня до осени – крупноклеточные диатомеи [1]. Также с весны по осень происходит снижение концентраций кремния. В последние годы наблюдается стабильный тренд уменьшения содержания данного биогенного элемента в деятельном слое прибрежно-шельфовой зоны моря [2]. Хорошо известно, что кремний (Si) необходим для роста диатомовых водорослей. Однако лимитирующие рост концентрации Si могут колебаться в пределах от 0,5 до 94 μM со средним значением 2,2 μM [3]. Эксперименты в мезокосмах показали, что мелкоклеточные диатомеи доминировали независимо от сезона, если концентрация Si превышала примерно 2,0 μM [4]. Выдвинута гипотеза, что отсутствие доминирования мелкоклеточных диатомей в фитопланктонном сообществе осенью связано с низким содержанием Si в среде.

Целью работы было изучить влияние пяти различных концентраций Si на структуру и продукционные характеристики фитопланктона.

Был проведен эксперимент по добавке различных концентраций Si в накопительную культуру фитопланктона северо-восточной части Черного моря. Вода для исследования была отобрана с конца пирса Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова (г. Геленджик) в октябре 2022 г. Далее пробы отфильтровали от зоопланктона и разлили в 15 пластиковых емкостей объемом 1 л. Емкости поместили в орбитальные шейкеры. Интенсивность света составляла 65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \times \text{с})$ ФАР, свето-темновой период был 16:8 ч. Выращивание происходило при комнатной температуре, которая совпадала с температурой в месте отбора проб. Эксперимент включал пять вариантов концентраций кремния в трех повторностях. Первый вариант был без добавок (Si = 0,62 μM). В остальные четыре варианта добавили кремний ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$). Конечная концентрация Si в культуральной среде во 2 варианте составила – 1,40 μM , в 3 – 1,97 μM , в 4 – 3,23 μM и в 5 – 5,31 μM . Во все варианты эксперимента также добавили нитраты ($\text{KNO}_3 = 14 \mu\text{M}$) и фосфаты ($\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O} = 1 \mu\text{M}$). Длительность эксперимента составила 7 суток. Анализ биогенных элементов проводился фотоколориметрическими методами [5] раз в 2-3 дня. В первый и последний день эксперимента были взяты и обработаны пробы фитопланктона стандартными методами. Активную флуоресценцию хлорофилла «а» измеряли ежедневно с помощью высокочувствительного флуориметра WATER-PAM-II (Walz, Германия). Измеряли минимальную (F_0) и максимальную (F_m) флуоресценцию образцов. Также была рассчитана максимальная квантовая эффективность ФСII (F_v/F_m).

В последний день эксперимента концентрация фосфатов составила 0-0,1 μM во всех вариантах эксперимента. Минимальные концентрации минерального азота были в пятом варианте (6,8 μM). Концентрация кремния во всех вариантах была меньше 1 μM и варьировала в пределах 0,43-0,82 μM .

Значение F_0 , показывающее обилие фитопланктона, было максимальным в 4 (14664 отн. ед.) и 5 (17377 отн. ед.) вариантах на 3 день эксперимента. В первый день F_0 было наибольшим в 1 варианте и составило 5744 отн. ед. В вариантах два и три на второй день эксперимента и составило 6771 и 9294 отн. ед. соответственно. Величина F_v/F_m , характеризующая потенциальную

способность фитопланктона к фотосинтезу, в эксперименте варьировала от 0,487 до 0,606 отн. ед. с наибольшими значениями в 4 и 5 вариантах.

В эксперименте доминирующими являлись два вида мелкоклеточных диатомовых водорослей – *Chaetoceros sp.* и *Thalassionema nitzschioides*. Также встречались диатомеи *Cylindroseteca closterium* и *Pseudo-nitzschia sp.* и кокколитофориды *Emiliania huxleyi*. Высокие значения биомасс *Chaetoceros sp.* наблюдались в 4 (1264,6 мг/м³) и 5 (1299,9 мг/м³) вариантах, где концентрация Si превышала 2 мкМ. В остальных трех вариантах эксперимента, где концентрация Si была ниже 2 мкМ, биомасса не превышала 150,0 мг/м³, а в первом варианте составила всего 3,4 мг/м³. Максимальные биомассы *T. nitzschioides* также были высокими в 4 (1008,6 мг/м³) и 5 (515,0 мг/м³) вариантах эксперимента.

Таким образом, экспериментальные исследования по влиянию добавок кремния в накопительную культуру фитопланктона показали, что концентрации биогенного элемента ниже 2 мкМ в среде становятся лимитирующими для мелкоклеточных диатомей. Низкое содержание кремния осенью может являться причиной отсутствия доминирования мелкоклеточных диатомей в фитопланктонном сообществе северо-восточной части Черного моря.

Исследования проведены при поддержке Российского научного фонда (№ 22-17-00066).

Список литературы

- 1) Silkin V., Pautova L., Podymov O., Chasovnikov V., Lifanchuk A., Fedorov A., Kluchantseva A. Phytoplankton Dynamics and Biogeochemistry of the Black Sea // J. Mar. Sci. Eng. 2023. 11. 1196. <https://doi.org/10.20944/preprints202305.0480.v1>.
- 2) Часовников В.К., Бородулина П.А. Тенденции межгодовой изменчивости биогенных элементов в северо-восточной части Черного моря по данным судовых наблюдений за 2017-2021 гг. // Экология гидросферы. 2022. № 2(8). С. 37-46. URL: <http://hydrosphere-ecology.ru/368> [https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2\(8\)-37-4](https://doi.org/10.33624/2587-9367-2022-2(8)-37-4)
- 3) Martin-Jezequel V., Hildebrand M., Brzezinski M.A. Silicon metabolism in diatoms: implications for growth // J. Phycol. 2000. V. 36. P. 821-840. <https://doi.org/10.1046/j.1529-8817.2000.00019.x>.
- 4) Egge J., Aksnes D. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition // Mar. Ecol. Prog. Ser. 1992. V. 83. P. 281-289. <https://doi.org/10.3354/meps083281>
- 5) Бордовский О.К., Чернякова А.М. Современные методы гидрохимических исследований океана. – Москва: Издательство АН СССР. Ин-т Океанологии, 1992. – 200 с.

ОЦЕНКА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОТОКА УГЛЕРОДА В ЧЁРНОМ МОРЕ, СВЯЗАННОГО С ДЫХАНИЕМ МИГРИРУЮЩИХ КОПЕПОД *CALANUS EUXINUS* И *PSEUDOCALANUS ELONGATUS*

Ляшко Т.В., Муханов В.С., Губанова А.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: поток углерода, биологический насос, Чёрное море, дыхание, *Calanus euxinus*, *Pseudocalanus elongatus*, суточные вертикальные миграции.

Наиболее распространённой формой суточных вертикальных миграций зоопланктона является ночная миграция, которая включает подъём животных в верхнюю часть пелагиали в тёмное время суток и их спуск в более глубокие слои днём. Во время своего перемещения в глубокие слои воды организмы, питающиеся на поверхности в тёмное время суток, переносят углерод на глубину, тем самым повышая эффективность биологического насоса [1]. При этом, дыхание организмов на глубине выступает одним из механизмов такого переноса посредством увеличения содержания растворённого углерода (в виде угольной кислоты) в толще воды.

Для Чёрного моря оценка транспорта углерода, связанного с суточными вертикальными миграциями зоопланктона, ранее не проводилась. В данной работе получены первые такие оценки потока углерода, связанного с дыханием черноморских копепод, для которых характерны активные суточные вертикальные миграции. Расчеты были проведены на основе данных 114-го (сентябрь 2020), 116-го (апрель-май 2021) и 118-го (август 2021) рейсов НИС «Профессор Водяницкий». Количественную обработку проб зоопланктона проводили в лаборатории порционным методом. Оценке подлежали старшие копеподитные стадии и самки копепод *Pseudocalanus elongatus* (Brady, 1865) и *Calanus euxinus* Hulsemann, 1991, которые относятся к наиболее активным видам-мигрантам в Чёрном море.

Расчёт нисходящего потока углерода (F) проводили по модифицированной формуле Dam et al. [2]:

$$F = B \times R \times h,$$

где B – биомасса мигрирующего зоопланктона ($\text{мг С} \cdot \text{м}^{-2}$);

R – интенсивность дыхания, зависящая от веса животного и температуры ($\text{мг С} \cdot (\text{мг С тела})^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$);

h – время, проведённое на глубине (ч).

Биомасса мигрирующего зоопланктона (B) была определена с помощью коэффициентов интенсивности вертикальных миграций по М.Е. Виноградову и К.А. Захваткиной. Время, проведённое на глубине (h), было оценено как фактическая протяжённость светового дня в точке пробоотбора.

В соответствии с полученными результатами, самки *C. euxinus* выступали главными «поставщиками» неорганического углерода в глубокие слои в результате дыхания. В апреле объём транспортируемого самками углерода составил $0,56 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в мае – $1,06 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе – $1,67 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в сентябре – $3,04 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Поток углерода, связанный с миграцией копеподитов С5 *C. euxinus*, в целом, был ниже. В апреле этот показатель составил $0,84 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в мае – $1,18 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе – $0,73 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в сентябре – $1,59 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Самки *P. elongatus* транспортировали меньшее количество углерода. Так, в апреле поток углерода, связанный с их суточными перемещениями, был равен $0,13 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в мае – $0,13 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе – $0,08 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в сентябре – $0,64 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Наконец, вклад копеподитов С4-С5 *P. elongatus* в транспорт углерода был наименьшим. В апреле он составил $0,09 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в мае – $0,25 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в августе – $0,06 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в сентябре – $0,22 \text{ мг С} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Таким образом, наибольший вклад в поток углерода, связанный с дыханием мигрирующих копепод, вносили самки *C. euxinus*, причём для всех групп, за исключением копеподитов С4-С5 *P. elongatus*, максимальные значения потока были обнаружены в сентябре. Общий поток углерода, связанный с дыханием копепод-мигрантов, составил, в сумме, 3,07 мг С·м⁻²·сут⁻¹ за период с апреля по сентябрь. В апреле данный показатель был равен 1,62 мг С·м⁻²·сут⁻¹, в мае – 2,63 мг С·м⁻²·сут⁻¹, в августе – 2,54 мг С·м⁻²·сут⁻¹ и в сентябре – 5,49 мг С·м⁻²·сут⁻¹.

Наши результаты, в целом, соответствовали величинам, которые были получены в других олиго- и мезотрофных районах Мирового океана. В частности, в субтропической части Тихого океана в районе о. Гавайи (на станции АЛОНА) поток, связанный с дыханием мигрирующего зоопланктона, в среднем, составлял $1,8 \pm 0,4$ мг С·м⁻²·сут⁻¹, в субарктической части Тихого океана – он был существенно выше, до 7 мг С·м⁻²·сут⁻¹, в Атлантике в Саргассовом море – наоборот, ниже, 1,5 мг С·м⁻²·сут⁻¹, в акватории у Канарских островов – 2,68 С·м⁻²·сут⁻¹ [3-5]. Наиболее существенное отличие может заключаться в том, что амплитуда вертикальных миграций зоопланктона в Чёрном море значительно меньше из-за наличия сероводородного слоя. Оценки потока углерода, впервые полученные для вод Чёрного моря, планируется дополнить расчётами вклада в биологический насос таких процессов, как выделение фекальных пеллет и смертность зоопланктона на глубине.

Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ ИнБЮМ № 1023032700553-3 «Трансформация структуры и функций экосистем морской пелагиали в условиях антропогенного воздействия и изменений климата».

Список литературы

- 1) Buesseler K.O., Boyd P.W. Shedding light on processes that control particle export and flux attenuation in the twilight zone of the open ocean //Limnology and Oceanography № 54(4). 2009. P. 1210-1232
- 2) Dam H.G., Roman M.R., Youngbluth M.J. Downward export of respiratory carbon and dissolved inorganic nitrogen by diel-migrant mesozooplankton at the JGOFS Bermuda time-series station //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers № 42(7). 1995. P. 1187-1197
- 3) Steinberg D.K., Van Mooy B.A., Buesseler K.O., Boyd P.W., Kobari T., Karl D.M. Bacterial vs. zooplankton control of sinking particle flux in the ocean's twilight zone // Limnology and Oceanography № 53(4). 2008. P. 1327-1338
- 4) Steinberg D.K., Carlson C.A., Bates N.R., Goldthwait S.A., Madin L.P., Michaels A.F. Zooplankton vertical migration and the active transport of dissolved organic and inorganic carbon in the Sargasso Sea //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers № 47(1). 2000. P. 137-158
- 5) Hernández-León S., Gómez M., Pagazaurtundua M., Portillo-Hahnefeld A., Montero I., Almeida C. Vertical distribution of zooplankton in Canary Island waters: implications for export flux //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers № 48(4). 2001. P. 1071-1092

ВНУТРИВИДОВАЯ ПРОСТРАНСТВЕННАЯ КОНКУРЕНЦИЯ У *HALICHONDRIA PANICEA* PALLAS, 1766 (PORIFERA: DEMOSPONGIAE)

Манойлина П.А.¹, Комендантов А.Ю.¹, Шапошникова Т.Г.², Халаман В.В.¹

¹ Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: морская губка, внутривидовая конкуренция, пространственная конкуренция, модульные организмы, Белое море, *Halichondria panicea*.

Внутривидовая конкуренция – один из основных факторов, определяющих динамику популяции и ее размерно-возрастную структуру [1,4]. Вместе с тем аспекты внутривидовой конкуренции у модулярных эпибентосных организмов до сих пор остаются слабо изученными [3]. Конкуренция снижает скорости роста и регенерации, поскольку на конкурентные взаимодействия расходуется энергия, которая могла бы быть использована для этих первичных процессов [6]. Приобретение ресурсов и избегание конкурентов достигаются за счёт корректировки форм роста у модульных организмов [2]. Размер и форма важны для модульных эпибентосных организмов, поскольку именно они определяют степень контакта с соседями и, следовательно, вероятность любого взаимодействия [5].

В данной работе были исследованы пространственные конкурентные взаимодействия между особями беломорской губки *Halichondria panicea*. В полевом эксперименте оценивали рост соседних изогенных и аллогенных фрагментов губки с изначально одинаковыми и разными размерами. Результаты экспериментов регистрировались через 3 и 13 месяцев экспозиции в морской воде. Параметры роста конкурирующих губок определяли по фотографиям с помощью программы ImageJ.

Между аллогенными особями *H. panicea* была выявлена внутривидовая конкуренция, которая выражалась в снижении относительного роста конкурирующих особей. Размер взаимодействующих особей влиял на выбор конкурентной стратегии. Губки росли наиболее интенсивно, когда их конкуренты изначально были крупнее их. При равном размере конкурентов рост губок был минимальным. В этом случае, вероятно, были задействованы другие защитные механизмы, но не активация роста. Конкуренция между изогенными особями *H. panicea* была слабой или отсутствовала, а слияние изогенных фрагментов увеличивало интенсивность роста и захвата субстрата губкой. Рост аллогенных и изогенных эксплантов до контакта происходит сходным образом. Повидимому, губки *H. panicea* не могут распознать генетическую природу конкурента на расстоянии. Анализируя направления роста губок, мы обнаружили явление, которое можно интерпретировать как попытку "избежать" контакта с конкурентом. В том случае, когда губка соседствовала с аллогенной особью, отличавшейся по размеру, рост в сторону конкурента был ниже, чем в других направлениях, независимо от того, достигли ли соседние особи контакта друг с другом или нет. Это может свидетельствовать о том, что благодаря каким-то механизмам дистантной коммуникации рост перенаправляется.

Исследование выполнено в рамках гос. задания "Динамика структуры и функционирование экосистем Белого моря и сопредельных арктических морей" (рег. номер 122031100283-9).

Список литературы

- 1) Bürger R., Schneider K.A., Willensdorfer M. The conditions for speciation through intraspecific competition // *Evolution*. 2006. V. 60. № 11. P. 2185–2206.
- 2) Franco M. The influence of neighbours on the growth of modular organisms with an example from trees // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*. 1986. V. 313. № 1159. P. 209–225..

- 3) Gappa L.J.J. Overgrowth competition in an assemblage of encrusting bryozoans settled on artificial substrata // *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 1989. V. 51. P. 121–130.
- 4) Liess M., Foit K. Intraspecific competition delays recovery of population structure // *Aquatic Toxicology*. 2010. V. 97. № 1. P. 15–22.
- 5) Meinig D.W. Reading the Landscape: An Appreciation os W.G Hoskins and J.B Jackson In: Meinig D.W. *The Interpretation of Ordinary Landscapes: Geographical Essays / - B. :* Oxford: Oxford University Press, 1979. 200 p.
- 6) Singh A., Thakur N.L. Influence of spatial competitor on the growth and regeneration of the marine sponge *Cinachyrella cf. cavernosa* (Porifera, Demospongiae) // *Hydrobiologia*. 2016. V. 768. № 1. P. 111–123.

СТРУКТУРА ПОПУЛЯЦИИ КРАБОВ РОДА *TRAPEZIA* НА РАННИХ СТАДИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ СООБЩЕСТВА КОРАЛЛОВОГО РИФА

Меркин В.А.

Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, г. Москва

Ключевые слова: кораллы, популяционная биология, *Pocilloporidae*, *Crustacea*, *Xanthidae*, морская биология

В последнее время появляется много работ, посвящённых биологии крабов-симбионтов коралловых рифов, в особенности облигатных симбионтов [1]. Ряд работ посвящены характеру расселения крабов на кораллах – показано, что крабы рода *Trapezia* в основном поселяются парами, одна пара занимает одну колонию [2]. Однако имеющиеся исследования посвящены популяционной структуре крабов на уже зрелых колониях, в то время как структура популяции на ранних этапах её формирования остаётся неизученной.

Изучение популяционной структуры симбионтов кораллов на ранних этапах жизни кораллов важно для понимания механизмов формирования кораллового сообщества и выработки стратегии по сохранению и восстановлению коралловых рифов.

Изучалась популяционная структура двух видов симбиотических крабов рода *Trapezia* – *T.septata* и *T.serenei* на двух экспозициях фрагментов кораллов *Pocillopora verrucosa*, высаженных на металлические рамки на глубине 4 метра. Крабы рода *Trapezia* отличаются особо тесными связями с населяемой ими колонией [3]. Экспериментальная часть проводилась в заливе Домбай, провинция Кханьхоа, Социалистическая Республика Вьетнам. Объём каждой экспозиции – 200 колоний. Возраст экспозиции №1 составляет 3 месяца с момента посадки, экспозиции №2 – 9 месяцев. По истечению данных сроков обе экспозиции с населяющей их симбиотической фауной были подняты с использованием водолазного снаряжения, зафиксированы 70% раствором этилового спирта и изучены в лабораторных условиях. Определялись следующие параметры симбиотических крабов: экстенсивность заселения, пол, количество и наличие эмбрионов у самок, характер размещения по колониям. Обработка данных производилась в программах Microsoft Excel 2010 и STATISTICA, подсчёт эмбрионов – в программе Count Things from Photos.

На экспозиции №1 особи *T.septata* обнаружены на 57,5% колоний, *T. serenei* – на 18% колоний. Половой состав на экспозиции №1 характеризовался преобладанием самцов у обоих видов (самцы у *T.septata* составляли 56,7% популяции (98 самцов), самки - 40% (68 самок)). *T. serenei* представлены 21 самцом и 4 самками (доля самцов и самок составляет 47,7 и 9% соответственно). Также обнаружено большое количество молодых особей *T. serenei* (43,2%), в то время как молодые особи *T.septata* на экспозиции №1 практически отсутствуют. Для *T. septata* на экспозиции №1 наиболее частый тип размещения на колонии – одиночный самец либо пара из самца и самки, для *T. serenei* – одиночный самец. В парах состоят 49,4% особей *T.septata* и 9,1% особей *T. serenei*. Обнаружено значительная доля самок *T. septata* с эмбрионами (42,6% от общего числа самок данного вида, 29 особей, средняя плодовитость 147 ± 118 эмбрионов) в то время как самок *T. serenei* с эмбрионами найдено только 2 (плодовитость 2 и 622 эмбриона).

На экспозиции №2 значительно вырастает численность особей обоих видов. Особи *T. septata* обнаружены на 86% колоний (208 самцов, 172 самки, 38 молодых особей). Особи *T. serenei* обнаружены на 85% колоний (191 самец, 81 самка, 112 молодых особей). Доля самок *T. serenei* значительно больше, чем на экспозиции №1 (21,1% от общего числа особей данного вида), в то время как доля самок *T. septata* остаётся почти неизменной (41,1%). Наиболее частый вариант размещения по колониям для обоих видов – пары, для *T. septata* значительна доля колоний с более, чем одной парой. Вырастает число пар для обоих видов (доля особей *T.septata* в парах –

57,9%, *T. serenei* – 35,4%). Доля самок с *T. septata* эмбрионами остаётся почти стабильной в сравнении с экспозицией №1 (45,9%, 79 особей, средняя плодовитость 992 ± 803 эмбриона), в то время как доля таковых самок *T. serenei* резко увеличивается (38,3%, 31 самка, средняя плодовитость 375 ± 567 эмбриона).

Различия между популяциями двух родственных видов позволяют говорить о различных репродуктивных стратегиях освоения новых биотопов. Для *T. septata* характерна оппортунистическая стратегия (быстрое освоение нового биотопа, быстрое возникновение относительно крупной популяции и начало активного размножения), в то время как стратегию *T. serenei* можно назвать специализированной (медленное освоение нового биотопа, переход к стадии активного размножения по мере роста коралловых колоний).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 22-24-00836.

Список литературы

- 1) Castro P. Movements between coral colonies in *Trapezia ferruginea* (Crustacea: Brachyura), an obligate symbiont of scleractinian corals // *Mar Biol.* 1978. V. 46. № 3. P. 237–245.
- 2) Gotteli N. J., Abele G. L. Community patterns of coral-associated decapods // *Marine Ecology – Progress Series.* 1983. V. 13. P. 131–139.
- 3) Stella J. S., Munday P. L., Jones G. P. Effects of coral bleaching on the obligate coral-dwelling crab *Trapezia cymodoce* // *Coral Reefs.* 2011. V. 30. № 3. P. 719–727.

ДАННЫЕ ПО СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ НЕКОТОРЫХ СООБЩЕСТВ МАКРОБЕНТОСА В БУХТЕ КИЕВКА В АВГУСТЕ 2023 Г.

Метревели В.Е., Галышева Ю.А.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: бухта Киевка, сублитораль, макробентос, донные сообщества, состав, биомасса, количественная оценка, плотность поселения

Бухта Киевка Японского моря испытывает минимальный антропогенный пресс. Однако на текущем этапе активно осуществляется рекреационное освоение её ресурсов и имеются планы на развитие аквакультуры. Сведений о таксономическом составе и количественном распределении макробентоса в этой бухте немного [1]. Анализ сообществ скалистых грунтов подводной части островов и банок был ранее проведен только по данным водолазных съемок 2003–2006 гг. [1]. Современные характеристики донных биоценозов неизвестны. Цель настоящей работы – на основании данных количественных проб 2023 г. выделить сообщества макробентоса, формирующиеся в б. Киевка, провести их описание и сравнить с данными предыдущих лет.

В пределах б. Киевка по геоморфологической характеристике [2] можно обнаружить следующие типы фаций: абразионные скальные склоны, скально-псефитовые бенчи, скально-псефитовые склоны, псаммитовые аккумулятивные равнины, пелитовые аккумулятивные равнины, псефито-пелитовые и псефито-псаммитовые аккумулятивные равнины. Для б. Киевка характерен свободный водообмен и интенсивный береговой сток.

Отбор проб макробентоса проведен в августе 2023 г. на 10 станциях в горизонте 1–5 м легко-водолазом. На твёрдых грунтах для отбора эпибентоса использовали гидробиологическую рамку в 1 м², на смешанных и мягких грунтах инфауну отбирали при помощи водолазного зубчатого дночерпателя с площадью захвата 0,025 м². Всего собрано и обработано 36 количественных проб макробентоса.

Определение видов макробентоса осуществляли по анатомо-морфологическим признакам. По каждой группе гидробионтов использовали специализированные атласы и определители. Современную таксономическую принадлежность выверяли по World Register of Marine Species (WoRMS).

В результате исследования в составе макробентоса обнаружено 77 видов из таксономических групп: Annelida, Arthropoda, Chlorophyta, Chordata, Cnidaria, Echinodermata, Magnoliophyta, Mollusca, Ochrophyta, Priapulida и Rhodophyta. Максимальным видовым разнообразием характеризуются подводные склоны островов Второго, Скалы, а также банка Хабарова (21–26 видов на станцию). Средняя биомасса общего макробентоса варьировала от 157,6 ± 41,2 г/м² до 8664,5 ± 2860,0 г/м², плотность поселения макрозообентоса изменялась в пределах 5,7 ± 1,3 экз./м² – 834,0 ± 107,0 экз./м².

Кластерный анализ схожести состава и структуры макробентоса был проведен в R (метод среднего присоединения) двумя способами: с использованием логарифмированных значений биомассы и обратных рангов видов. Оба анализа показали группировку десяти обследованных станций в пять кластеров, принятых нами за отдельные сообщества макробентоса.

Сообщество *Zostera marina* сформировано в зоне псефито-псаммитовой аккумулятивной равнины. В грунте присутствует битая раковина и ил. Всего идентифицировано 14 видов, значение биомассы максимально из всех полученных в ходе выполнения съемки значений (8665 г/м²), доля доминанта составляет 71,6% (6204,5 г/м²), плотность поселения животных также максимальны 834,0 экз./м². Наиболее значимые по биомассе виды: *Ruditapes philippinarum*, *Strongylocentrotus intermedius*, *Mya arenaria*, *Leukoma euglypta*, *Eupentacta fraudatrix*, *Macoma incongrua*. Сообщество было описано в бухте ранее [1].

Сообщество *Buccinum middendorffii* + *Scaphechinus griseus* распространено на заиленном песке на глубине 5 и более метров в восточной части б. Киевка в зоне псаммитовой аккумулятивной равнины. В составе ценоза обнаружено 6 видов морских беспозвоночных. Значение биомассы составляет 325,3 г/м² (доля доминантов – 50,8% и 27,5%), плотность поселения – 160 экз./м². Наиболее значимые по биомассе виды: *Acila insignis*, *Priapulus* sp., *Umbonium costatum*.

Биоценоз *S. intermedius* + *Crenomytilus grayanus* охватывает абразионные скальные склоны мысов западного побережья б. Киевка и обращенное к открытому морю подножье о. Второй. Всего идентифицировано 25 видов макробентоса (8 видов растений и 17 видов животных). Значения биомассы и плотности поселения животных для этого ценоза составляют 320,0 г/м² и 7,0 экз./м², соответственно. На доминантов приходится 51,5% и 23,3% биомассы. Наиболее значимые по биомассе виды: *Desmarestia viridis*, *Mesocentrotus nudus*, *Asterina pectinifera*. Сообщество было описано ранее [1].

Сообщество *Saccharina japonica* + *Phyllospadix iwatensis* + *S. intermedius* выявлено нами на абразионных скальных склонах в районе островов Скалы и Второй, а также на скально-псефитовом бенче – подводной скалистой гряде, тянущейся от о. Второй до малого кекура напротив базы ТИПРО в юго-восточной части бухты. В состав сообщества входят 42 вида (11 видов растений и 31 вид животных). Значение общей биомассы составляет 1681,0 г/м², плотности поселения животных – 130,2 экз./м². Доля доминантов в общей биомассе составляет 31,2%, 25,6% и 12,4%, соответственно. Наиболее значимыми по биомассе видами этого ценоза являются также *Costaria costata*, *C. grayanus*, *Modiolus modiolus*, *Mytilus unguiculatus*, *Littorina squalida*. В начале 2000-х гг. этот биоценоз также был характерен для бухты [1].

Сообщество *M. unguiculatus* занимает в настоящее время площадь дна на скально-псефитовом бенче, протянувшимся от банки Хабарова до о. Скалы в восточной части б. Киевка. Ранее биоценоз с доминированием мидии блестящей не выявлялся. В видовом составе насчитывается 35 видов: 8 видов растений и 27 видов животных. Значение общей биомассы для этого сообщества составляет 1528,0 г/м², плотности поселения животных – 50,5 экз./м². Доля доминанта в общей биомассе существенна и составляет 65,7% (1004,6 г/м²). Наиболее значимые по биомассе виды: *S. intermedius*, *S. japonica*, *Ph. iwatensis*, *A. pectinifera*, *M. nudus*.

Таким образом, три из пяти выделенных нами биоценозов были описаны для б. Киевка ранее по данным начала 2000-х гг. – т.е. благополучно существуют порядка 20 последних лет. Ценные промысловые виды – серый морской еж, мидия Грея, букцидум Миддендорфа, сахарина японская имеют высокие показатели обилия, подтверждая значимость б. Киевка для сохранения природно-ресурсного потенциала Приморского края.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственных заданий Министерства науки и высшего образования РФ № FZNS-2023-0011 в части проведения водолазной съемки и № FZNS-2023-0019.

Список литературы

- 1) Галышева, Ю.А. Макробентос бухты Киевка и условия его существования: монография / Ю.А. Галышева, С.И. Коженкова – Владивосток: Изд-во: ДВФУ, 2023.182 с.
- 2) Петренко, В.С. Физическая география залива Петра Великого. / В.С. Петренко, В.А. Мануйлов – Владивосток: ДВГУ, 1988 – 146 с.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ НА СООБЩЕСТВА МИКРООРГАНИЗМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ КАРСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ МЕТОДАМИ МЕТАГЕНОМИКИ

Мишустина Е.П.¹, Трофимова А.Б.^{2,3}

¹Биологический факультет, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Москва

²Лаборатория анализа метабеномов, Сколковский институт науки и технологий, Москва

³Лаборатория анализа метабеномов, Институт биологии гена РАН, Москва

Ключевые слова: Арктика, микробные сообщества, метабеномика.

Большинство исследований, проводимых в акваториях Арктики, посвящено изучению различных гидрофизических процессов, а также изучению макроорганизмов, в то время как взаимосвязь состава микробных сообществ северных морей в зависимости от гидрофизической динамики практически не исследована [1]. Анализ состава микробных сообществ осложнён тем, что многие группы микроорганизмов являются некультивируемыми [2]. Однако, современные методы метабеномики позволяют анализировать состав бактериальных сообществ и его динамику в самых разнообразных биотопах, включая такие труднодоступные и малоизученные, как Арктические моря.

В ходе рейса на НИС «Дальние Зеленцы» в июле 2023 года были отобраны образцы поверхностного слоя воды акватории Карского и Баренцева морей. Особое внимание было уделено проливу Карские Ворота, как месту со сложной гидрофизической динамикой, где основной поток относительно теплой морской воды из Баренцева моря встречается с обратными холодными течениями из Карского моря [3].

С целью изучения влияния гидрофизических процессов на состав микробных сообществ был проведен отбор образцов поверхностной морской воды вдоль поперечного разреза в проливе Карские Ворота. Точки отбора проб определялись в соответствии со спутниковыми данными. В каждой точке также были измерены поверхностная температура и соленость воды.

Микроорганизмы из отобранных образцов воды осаждали на фильтрах Sterivex с последующим выделением тотальной ДНК и секвенированием гена 16S рРНК. С использованием методов секвенирования проведена оценка таксономического состава микроорганизмов Карского и Баренцева морей. Показано, что в микробных сообществах пролива Карские Ворота преобладают бактерии из филумов Bacteroidota, Alphaproteobacteria, Pseudomonadota, Actinomycetota. Доминирующими были представители семейств Flavobacteriaceae, Rhodobacteriaceae, а также бактерии входящие в семейство Pelagibacterales. Кроме того, в образцах в значимых количествах детектировались бактерии семейств Microbacteriaceae, Pseudoalteromonadaceae. Проведенный нами сравнительный анализ состава микроорганизмов из проб, отобранных в разных местах поперечного разреза пролива Карские Ворота, показал кластеризацию бактериальных сообществ в зависимости от солёности и температуры воды.

Полученные метабеномные данные показали, что по составу микробного сообщества станция №18 и станции №20-22 ближе друг к другу, чем остальные. При этом они находятся на значительном расстоянии друг от друга и в различных водных течениях, судя по спутниковым данным. Следовательно, можно было бы ожидать значительных различий в микробном составе на этих станциях.

Возможно, данная аномалия связана с тем, что водная масса была принесена вихревой микроструктурой, которая видна по графикам распределения температуры и солености, но не видна на T-S диаграмме, которая показывает различные водные массы в области станций отбора №18 (в силу особенностей метода, который применяется для больших расстояний и не детектирует тонкую структуру течений, которая, возможно, формируется в данном случае).

Таким образом, был исследован состав бактериальных сообществ поверхностного слоя воды вдоль поперечного разреза пролива Карские Ворота и его изменение в зависимости от гидрофизической динамики.

Авторы благодарят И. Е. Козлова (зав. Лаборатории морских полярных исследований МГИ РАН) и Д.М. Соловьева (Отдел дистанционных методов исследований МГИ РАН) за предоставленные спутниковые снимки.

Исследование выполнено в рамках проекта Минобрнауки РФ «Атлас микробных сообществ Российской Федерации», №15.ИП.21.0013, а также при поддержке научно-образовательной программы «Плавучий университет» (соглашение № 075-01593-23-06)

Список литературы

- 1) Дженюк С.Л. и др. Биология и океанография Северного морского пути: Баренцево и Карское моря. Л.: Наука. 2007. 323 с.
- 2) Hugenholtz P. Exploring prokaryotic diversity in the genomic era // Genome biology. 2002.
- 3) Morozov, E.G., Kozlov, I.E., Shchuka, S.A., & Frey, D.I. Internal tide in the Kara Gates Strait // Oceanology. 2017. 57(1), 8–18.

ИЗМЕНЕНИЕ РЕПРОДУКТИВНОГО СТАТУСА ПРИМОРСКОГО ГРЕБЕШКА *MIZUHOPECTEN YESSOENSIS* НА ФОНЕ ПОВЫШЕННОЙ СМЕРТНОСТИ МОЛОДИ В ЗАЛИВЕ ФУНКА ТИХОГО ОКЕАНА

Мокрина М.С.^{1,2}, Нагасава К.², Канамори М.³, Натсуйке М.³, Осада М.².

¹Лаборатория физиологии, Национальный научный центр морской биологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

²Лаборатория аквакультурной биологии, Высшая школа сельскохозяйственных наук, Университет Тохоку, Сендай, Япония

³Научно-исследовательский институт рыболовства Хакодате, Отдел исследований рыболовства, Научно-исследовательская организация Хоккайдо, Хакодате, Япония

Ключевые слова: сперматогонии, оогонии, гаметы, репродуктивный цикл, репродуктивный статус, двустворчатые моллюски

Приморский гребешок, *Mizuhopecten yessoensis*, широко распространен вдоль побережья Приморского края и острова Сахалин, северной части островов Хонсю и Хоккайдо и северной части Корейского полуострова. Это один из наиболее коммерчески важных объектов марикультуры, культивируемых в Японии, Китае, России и Корее. С 2000 года совокупный рынок приморского гребешка превышает 1,5 млрд долларов США в год. С целью наиболее эффективного воспроизводства этой группы двустворчатых моллюсков для применения в аквакультурных хозяйствах необходимы фундаментальные знания о репродуктивном цикле, в частности, описание стадий созревания гонад. Процесс развития гонад у гребешка состоит из 7 стадий: отсутствия дифференциации, ранней дифференциации, роста, зрелости, нереста, пост-нереста и дегенерации. В настоящей работе методом иммуногистохимии с антителом против *my-Vasa* впервые был описан состав различных клеточных популяций гамет на разных стадиях созревания гонады на протяжении репродуктивного цикла.

Годовалых морских гребешков *M. yessoensis* из залива Функа, Хоккайдо, Япония, использовали в качестве экспериментальных животных каждый месяц с мая 2018 по май 2019 года. У животных измеряли размеры раковин, массу мягкого тела и массу гонад; рассчитывали гонадный индекс (ГИ). Для гистологического анализа среднюю часть гонады фиксировали и заливали в парафин по стандартной схеме. Полученные на ротационном микротоме серийные срезы использовали для морфологического (гематоксилин-эозин) и иммуногистохимического окрашивания. Иммуногистохимическое окрашивание *my-Vasa*-положительных клеток проводили для описания обновления и начала нового цикла созревания гонад во время сезонной изменчивости. Для проведения количественного анализа и статистической оценки различий между стадиями созревания подсчитывали несколько выбранных параметров в яичниках и семенниках (n=5 особей каждого пола каждый месяц с мая 2018 г. по май 2019 г.). Для статистического анализа сезонных изменений состава клеточных популяций гамет использовали критерий Крускала-Уоллиса и критерий множественного сравнения Данна. Для сравнения сезонного изменения ГИ между поколением 2018 года (май 2018 г.-май 2019 г.) и средними значениями за предыдущие 15 лет (2003-2017 гг.) использовали тест Манна-Уитни. Статистический анализ проводили с использованием программы GraphPad Prism 8.4.3 (GraphPad Software, Калифорния, США).

Для оценки морфологических изменений, сопровождающих созревание гонад на протяжении репродуктивного цикла, был проведен количественный анализ состава клеточных популяций гонад. Для описания оогенеза были выделены три типа популяций зародышевых клеток яичников (незрелые оогонии [диаметр клеток; <20 мкм], растущие ооциты [20-50 мкм] и зрелые ооциты [>50 мкм]), а также подсчитано количество клеток для каждой популяции. Для количественного

анализа сперматогенеза измеряли площади незрелых (сперматогоний и сперматоцитов) и зрелых (т. е. сперматид и сперматозоидов) популяций гамет. Кроме того, было подсчитано среднее число сперматогоний и сперматоцитов в одном ацинусе.

Количественный анализ выявил сдвиг числа клеток и изменение состава клеточных популяций гамет, что связано с процессом созревания гонад. Иммуногистохимическое окрашивание с антителом против *my-Vasa* показало, что незрелые гаметы расположены на базальной мембране ацинусов гонады и присутствуют на всех стадиях созревания как в яичнике, так и в семенниках. В семенниках с ноября по март наблюдалось постепенное увеличение числа *my-Vasa*-положительных незрелых половых клеток. Напротив, в яичнике с сентября по ноябрь наблюдалось увеличение числа *my-Vasa*-положительных незрелых половых клеток.

Регулярный нерест гребешков в заливе Функа обычно наблюдается в апреле и мае. Однако, в июле и августе 2018 года наблюдался дополнительный «малый» пик нереста гамет у самцов и самок. В яичнике количество гамет уменьшалось в мае и июне после выхода яйцеклеток, однако неожиданное увеличение числа незрелых оогониев и зрелых ооцитов наблюдалось в июле и августе. Аналогичным образом, в семенниках площади ацинусов уменьшились в июне после высвобождения сперматозоидов, а в июле и августе 2018 года началось повторное созревание гамет. В это время было обнаружено, что семенники содержат незрелые сперматоциты, сперматогонии, небольшое число сперматид и зрелую сперму. Иммуногистохимический анализ подтвердил, что незрелые гаметы, наблюдавшиеся летом 2018 года, были *my-Vasa*-положительными, что указывает на их нормальное развитие.

Для оценки атипичного явления «малого» нереста, наблюдаемого летом 2018 года, сравнивали ГИ выловленных гребешков поколения 2018-2019 года с регистрируемым в течение последних 15 лет ГИ местной популяции, выращиваемой на том же участке аквакультуры. Было показано, что гребешки, выловленные в 2018 году, демонстрируют самый высокий зарегистрированный ГИ в июле и августе с начала ведения наблюдений (2003 г.). Кроме того, статистический анализ выявил, что ГИ поколения 2018 года достоверно выше средних ГИ с 2003 по 2017 год в июле ($p < 0,0001$), августе ($p < 0,0001$), январе ($p < 0,0001$), марте ($p < 0,0001$) и апреле ($p < 0,0001$). К тому же, была выявлена взаимосвязь иррегулярных показателей ГИ и повышенной смертности молодежи. Чтобы оценить взаимосвязь между смертностью молодежи гребешка и изменениями ГИ, было выполнено сравнение периодов с высокой (2003, 2004, 2010, 2016 и 2018 гг.) и низкой смертностью молодежи (2005-2009, 2011-2015, 2017 гг.). Сравнение ежемесячных значений ГИ в годы с высокой смертностью и годы с низким уровнем смертности показало, что средние значения ГИ в годы с высокой смертностью были значительно выше, чем в годы с низкой смертностью летом (июль и август) и в декабре.

По результатам проведенных исследований можно предположить, что феномен иррегулярного развития гамет является защитной реакцией, вызванной последствиями высокой смертности молодежи. Таким образом, увеличение ГИ летом можно использовать в качестве индикатора нормального развития и здоровья приморского гребешка, выращиваемого в аквакультуре.

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке японского общества содействия науке – Japan Society for the Promotion of Science (KAKENHI)

ЭПИФИТЫ *ASCOPHYLLUM NODOSUM* (РНАЕОРНУСЕАЕ) В ГУБЕ ТЕРИБЕРСКАЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Нерезенко А.М.¹, Тупицына С.А.¹, Рыжик И.В.², Малавенда С.В.²

¹Мурманский арктический университет, г. Мурманск

²Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск

Ключевые слова: видовое разнообразие, видовой состав, фукоиды, эпифиты, *Elachista fucicola*, *Vertebrata lanosa*, полифенолы, маннит, пигменты, каталаза.

Бурая водоросль *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jolis является одним из доминирующих видов на побережье северной Атлантики и юга Баренцева и Карского морей. Это ценный промысловый вид и один из ключевых видов морских прибрежных экосистем. Широко исследуются продукционные процессы у *A. nodosum* и биохимические особенности в связи с экологическими факторами, среди которых важнейшими оказались межвидовые взаимодействия. Устоялась точка зрения о симбиотическом взаимодействии *A. nodosum* с *Vertebrata lanosa* (Linnaeus) T.A.Christensen (Rhodophyta), *Elachista fucicola* (Vellei) Areschoug (Phaeophyceae), *Mycophycias ascophylli* (Cotton) Kohlm. & Volkm.-Kohlm. (Ascomycota) [1]. Остается малоизученной северо-восточная часть популяции, и важно понять для прогнозирования экспансии вида на север, как сказывается специфические скудные световые и тепловые условия на взаимодействие видов.

В докладе представлены результаты исследования взаимного влияния эпифитов и *A. nodosum* в губе Терiberская Баренцева моря в 2022 году. Район исследования выбран как наиболее доступный и экологически чистый. Условия произрастания можно считать характерными для всего Мурманского побережья. Определяли видовой состав, биомассу, встречаемость эпифитов и их расположение на талломе. Оценивали также биомассу самого *A. nodosum* и характер распределения в губе. Содержание полифенолов в бурой водоросли определяли с использованием стандартной методики Фолина-Дениса, модифицированной для водорослей (Сиренко, 1975). Активность каталазы измеряли методикой спектрофотометрического измерения активности каталазы (Королюк, 1988). Содержание маннита в бурой водоросли определяли по модифицированному методу (Облучинская, 2008). Фотосинтетические пигменты бурых водорослей определяли по методу Сиили (Seely et al., 1972). Спектрофотометрию проводили при 725-730 нм (спектрофотометр СФ-46). Определение абсолютно сухой массы образцов проводилось согласно общепринятой методике. (Водоросли, 2004).

В губе Терiberская фукоиды формируют плотные заросли на литорали. *A. nodosum* распространен на скалах и валунах пляжей во внутренней части залива, не заходя в устье реки Терiberка. Наибольшую плотность популяция достигает на скалах и валунах на высоте среднего горизонта литорали, летом 2022 составила 14920 ± 593 г/м². В районе исследования на *A. nodosum* выявлено 9 видов эпифитных макроводорослей, в том числе 2 вида красных, 2 - зеленых и 5 бурых водорослей. Биомасса каждого вида составила менее 1 г/м², а встречаемость составила не более 10 % от всего числа проб. Наибольшая биомасса и встречаемость выявлена у *E. fucicola* и *L. marina*. Распределение эпифитов на талломе было в основном на вершинах ветвей не далее пузыря, то есть возрастом один год. Гистологические исследования показали, что у *E. fucicola* и *V. lanosa* клетки проникают в срединный слой аскофиллума, в отличие от других видов взаимодействие которых происходит на уровне корового слоя фукоидов.

Было отмечено повышенное содержание полифенолов в тканях *A. nodosum* в зоне прикрепления *V. lanosa*. В зонах прикрепления эпифитов концентрация пигментов (Хлорофилл А, Хлорофилл С, Смесь каротиноидов, включая фукоксантин не отличалась от остальной части таллома. В распределения маннита в талломе *A. nodosum* не было отмечено существенных различий между

участками с *E. fucicola* и участками, свободных от эпифитов. В зонах прикрепления *E. fucicola* концентрация каталазы не отличалась от свободных от эпифитов участков.

В результате проведенных исследований можно сделать вывод, что характер взаимодействия *A. nodosum* с его эпифитами в условиях субарктики (на примере губы Терiberская) аналогичен более южным районам. Скудное освещение не влияет на симбиоз и не выявлено влияния на продукционные характеристики фукоида.

Исследование выполнено в рамках Госзадания ММБИ РАН по теме Тема 9-22-01 (1.6.16) - «Донные биоценозы Баренцева моря, его водосборного бассейна и сопредельных вод в современных условиях».

Список литературы

- 1) Pereira L. et al. A concise review of the brown macroalga *Ascophyllum nodosum* (Linnaeus) Le Jolis // *Journal of Applied Phycology*. 2020. V. 32. P. 3561–3584.
- 2) Seely G.R., Duncan M.J., Vidaver W.E. Preparative and analytical extraction of pigments from brown algae with dimethyl sulfoxide // *Marine Biology*. 1972. V. 12. P. 184–188.
- 3) Водоросли морские, травы морские и продукты их переработки. Методы анализа. ГОСТ 26185-84. Введён 01.01.85. М., Изд-во стандартов. 2004. 34 с.
- 4) Королюк М.А. и др. Метод определения активности каталазы // *Лабораторное дело*. 1988. № 4. С. 44–47.
- 5) Облучинская Е.Д. Сравнительное исследование бурых водорослей баренцева моря // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2008. Т. 44. № 3. С. 337–342.
- 6) Сиренко Л.А., Сакевич А.И., Осипович Л.Ф. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. Наукова думка, 1975.

ВИДОВОЙ СОСТАВ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕЛАГИЧЕСКИХ АМФИПОД АРКТИЧЕСКОГО БАССЕЙНА

Осипова Д.Д., Кособокова К.Н.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: зоопланктон, Арктический бассейн, амфиподы.

Основное внимание в исследованиях морского зоопланктона, в том числе арктического, обычно уделяется представителям группы веслоногих ракообразных (Copepoda), поскольку они доминируют в планктоне по численности и биомассе [1]. Сведения о видовом составе и экологии других таксономических групп, в том числе пелагических бокоплавов (Amphipoda), в большинстве работ немногочисленны и отрывочны. Тем не менее, свободноживущие амфиподы представляют собой важный компонент планктонных сообществ. Наиболее массовые арктические виды пелагических амфипод *Themisto abyssorum* (Boeck, 1871) и *T. libellula* (Lichtenstein in Mandt, 1822) — активные хищники. Эти амфиподы являются важным компонентом пищевой сети и ключевым звеном между растительным зоопланктоном и более высокими трофическими уровнями [2]. Важная роль группы Amphipoda в структуре и функционировании планктонных сообществ и ее малая изученность ярко свидетельствуют о необходимости описания разнообразия их фауны и изучения их экологии.

В данной работе были использованы материалы экспедиций научно-исследовательского ледокола «Polarstern» ARK IX/4, ARK XI/1, ARK XII, ARK XIV, PS101 и ледокола морской береговой охраны США «Healy» — «Hidden Ocean, Ocean Exploration 05/2». Обработано 183 пробы с 43 станций. Во всех экспедициях послонный облов по горизонтам осуществлялся сетями Multinet Midi и Maxi с ячейей 150 мкм.

Всего в пробах было обнаружено 1109 особей Amphipoda, определено 17 видов. Самый многочисленный вид — *T. abyssorum*. Вторым по числу обнаруженных экземпляров был *T. libellula*, третьим — *Cyclocaris guilelmi* Chevreux, 1899. Из 17 видов семь были встречены лишь однократно.

Всех особей измеряли, принимая за длину тела расстояния от конца головы до окончания третьих уropод. Среди видов, представленных более чем одной особью, наибольшим разбросом размеров обладали: *Eusirus holmii* Hansen, 1887 — от 1.5 до 30 мм; *T. libellula* — от 1.5 до 23 мм; *C. guilelmi* — от 2 до 21 мм.

Все обнаруженные виды имели определенные вертикальные диапазоны распределения по глубине. Виды рода *Themisto* населяли сходный диапазон глубин, однако *T. abyssorum* единично встречался до 2800 м, в то время как *T. libellula* не был встречен глубже 800 м. Большая часть зарегистрированных видов не была обнаружена в эпипелагиали, а заселяла глубины более 200 м.

Так как виды рода *Themisto* являются наиболее массовыми и существенно превосходят по численности остальные, именно они вносят основной вклад в общую численность амфипод. Общая численность достигает максимума в поверхностном слое и резко снижается к глубине 200 метров, после чего продолжает медленно падать.

Наши данные показывают, что глубины обитания *T. abyssorum* изменяются в ходе онтогенетических миграций. Основная часть мелких ювенильных особей сосредоточена в эпипелагиали, в то время как крупные, достигшие половой зрелости особи, опускаются глубже и сосредоточены в мезопелагиали. В структуре популяций этого вида существуют и географические различия. В Евразийском бассейне средняя численность *T. abyssorum* достигала своего максимума у самой поверхности (0,7 экз/м³ в слое 0–25 м), в то время как в Канадском максимум численности наблюдался несколько глубже (1,4 экз/м³ в слое 25–50 м). Однако численность вида в Евразийском бассейне в мезопелагиали (200–500 м) была заметно выше, чем в Канадском, где глубже 200 м этот вид практически не встречался. Кроме того, различия наблюдались и в размерной структуре

популяций двух бассейнов. В Канадском бассейне особи редко достигали таких размеров, как в Евразийском. В Канадском бассейне их длина составляла в среднем $3,6 \pm 1,5$ мм, в то время как в Евразийском - $6,8 \pm 4,5$ мм.

T. abyssorum – индикатор атлантических вод [3], поступающих в Северный Ледовитый океан через пролив Фрама на глубинах 200-1000 м, и именно к этим глубинам оказываются приурочены особи *T. abyssorum* в Евразийском бассейне.

Глубины обитания *T. libellula* также изменяются в ходе онтогенетических миграций. В отличие от *T. abyssorum*, ювенильные стадии этого вида заселяют более широкий диапазон глубин от 0 до 200 м. Взрослые особи сосредоточены в диапазоне 200-500 м. В случае с *C. guilelmi* онтогенетических изменений глубин обитания не наблюдалось. Особи всех размерных классов были распределены равномерно в занимаемом этим видом диапазоне глубин.

Проведенный анализ позволил уточнить данные о видовом составе, вертикальном и географическом распределении массовых видов пелагических амфипод Арктического бассейна, а также составить карты географического распространения обнаруженных видов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-17-00-121.

Список литературы

- 1) Кособокова К. Н. Зоопланктон Арктического бассейна океана: Структура сообществ, экология, закономерности распределения / К. Н. Кособокова, Москва: ГЕОС, 2012. 271 с.
- 2) Dalpadado P. [et al.]. Distribution and abundance of euphausiids and pelagic amphipods in Kongsfjorden, Isfjorden and Rijpfjorden (Svalbard) and changes in their relative importance as key prey in a warming marine ecosystem // Polar Biology. 2016. № 10 (39). P. 1765–1784.
- 3) Dalpadado P. Inter-specific variations in distribution, abundance and possible life-cycle patterns of *Themisto* spp. (Amphipoda) in the Barents Sea // Polar Biology. 2002. № 9 (25). P. 656–666.

ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ОБИЛИЕ СИМБИОНТОВ КОРАЛЛА *POCILLOPORA VERRUCOSA*

Петроченко Р.А.¹, Лищенко Ф.В.^{1,2}, Бурмистрова Ю.А.¹, Бритаев Т.А.¹

¹Институт проблем экологии и эволюции им А.Н. Северцова Российской академии наук, г. Москва

²Российско-Вьетнамский Тропический научно-исследовательский и технологический центр, приморское отделение, г. Нячанг

Ключевые слова: симбионты, экология, кораллы, *Pocillopora*, ракообразные.

Коралловые сообщества обладают огромным биоразнообразием животных, обусловленным сложной структурой коралловых колоний. Многие беспозвоночные животные и рыбы, обитающие на коралловых рифах, являются симбиотическими. Значительная часть такой симбиофауны не может жить в отсутствие коралла – такие животные являются облигатными симбионтами. Они защищают колонии от хищников и очищают их от организмов-обрастателей и скоплений осадка, в обмен получая источник питания, убежище или место нереста [1]. На структуру и устойчивость симбиотического сообщества влияют различные факторы, как биотические, так абиотические. Некоторые из факторов исследованы лучше других. Например, влияние объёма колоний на состав сообщества изучено весьма подробно, тогда как влияние таких факторов, как время экспозиции и плотность посадки колоний остаются малоисследованным и местами противоречивым. Бличинг или обесцвечивание колоний кораллов – один из важнейших факторов, негативно влияющих на состояние коралловых сообществ в целом и, в частности, на популяции облигатных симбионтов [2]. Однако, полученные ранее результаты относятся к воздействию катастрофического бличинга, тогда как влияние сезонного (регулярного) бличинга на симбионтов не исследовано. Малоисследованным остаётся также влияние частичной смертности колоний.

Целью работы было экспериментальное исследование плотности поселения кораллов, экспозиции колоний (возраста), бличинга и мёртвых участков на структуру симбиотических сообществ. Мы предполагали, что с увеличением размера кораллов, плотности их посадки и времени экспозиции высаженных колоний видовое богатство и обилие симбионтов будут увеличиваться, а при бличинге – снижаться.

В качестве объекта исследования были выбраны ветвистые кораллы *Pocillopora verrucosa* Ellis & Solander, 1786. Полигон для эксперимента располагался во Вьетнаме, в бухте Дам Бай недалеко от города Нячанг. В ходе него 200 мелких фрагментов колоний коралла были собраны, очищены от симбионтов и высажены на металлические рамки размером 1x1,5 м, возвышающиеся над дном на 40 см, с плотностью 20, 30, 40, 50 и 60 фрагментов на рамку. Эксперимент был начат в апреле 2020 года. Через 3 месяца экспозиции фрагменты были собраны, а все макросимбионты, населяющие их, собраны, зафиксированы в 70% этаноле, идентифицированы и подсчитаны. Очищенные от симбионтов колонии были снова помещены на рамки для второго этапа эксперимента со временем экспозиции 9 месяцев. После 9 месяцев экспозиции измерения колоний, их фотографирование и сбор симбиофауны осуществлялись аналогично первому этапу. Экспериментальные работы по посадке и отбору проб были завершены в апреле 2021 года. Для оценки бличинга два раза в месяц оценивали окраску каждой колонии по 6-бальной шкале Сибека [3]. Наличие мёртвых участков определялось визуально.

Для оценки влияния факторов среды на видовое богатство и обилие симбионтов использовались обобщённые линейные модели (generalized linear models, GLZ). Статистический анализ осуществлялся в программе Statistica 13.

Эксперимент по выращиванию колоний кораллов в условиях искусственной посадки показал, что уже спустя 3 месяца экспозиции колонии населяла разнообразная и многочисленная фауна

(63 вида животных, из которых 19 были облигатными симбионтами). После экспозиции в 9 месяцев разнообразие фауны компонентных сообществ увеличивается, а разнообразие симбионтов облигатных превышает известное ранее в других районах Мирового океана (всего 85 видов, из которых 21 – облигатные симбионты).

С увеличением экспозиции растут видовое богатство и обилие симбионтов: эти характеристики достоверно выше на колониях *Pocillopora verrucosa* в возрасте 9 месяцев, чем на колониях в возрасте 3 месяца.

Плотность посадки кораллов достоверно оказывает положительное влияние на видовое богатство и обилие симбионтов коралла *Pocillopora verrucosa*, это влияние отчетливее для облигатной симбиофауны.

За время исследования были отмечены колонии с частичным бlichингом – от 2 до 4 баллов по шкале Сибека. Согласно результатам тестов, бlichинг не оказал статистически значимого влияния на видовое богатство и обилие симбионтов. Вероятно, это обусловлено степенью его развития: отмеченный уровень в 2-2,5 балла по шкале Сибека ниже летального для кораллов уровня в 1 балл и не оказывает существенного влияния на смертность кораллов. В то же время, частичная смертность колоний положительно повлияла на видовое богатство и обилие неспециализированной симбиофауны.

Результаты работы подтверждают гипотезу о связи времени экспозиции и плотности посадки колоний коралла со структурой симбиотических сообществ.

Исследование/проект выполнен при поддержке гранта РФФИ 22-24-00836.

Список литературы

- 1) Glynn P.W., Enochs I.C. Invertebrates and their roles in coral reef ecosystems // Coral Reefs: An Ecosystem in Transition.: Springer Netherlands, 2011. P. 273–325.
- 2) Stella J.S., Munday P.L., Jones G.P. Effects of coral bleaching on the obligate coral-dwelling crab *Trapezia cymodoce* // Coral Reefs. 2011a. V. 30, № 3. P. 719–727.
- 3) Siebeck U.E., Marshall N.J., Klüter A., Hoegh-Guldberg O. Monitoring coral bleaching using a colour reference card // Coral Reefs. 2006. V. 25, № 3. P. 453–460.

ПАРАЗИТОФАУНА И МИКРОФЛОРА КОМАНДОРСКОГО КАЛЬМАРА *BERRYTEUTHIS MAGISTER* (BERRY, 1913)

Прозоров А.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград

Ключевые слова: Ключевые слова: кальмар, паразитофауна, микрофлора кальмара, дальневосточный регион.

Объектом нашего исследования был пелагический океанический вид *Berryteuthis magister* (Командорский кальмар), являющийся типичным представителем семейства Gonatidae. Это единственный вид кальмаров из своего семейства, который вылавливается в Тихом океане в промышленных масштабах. Все исследуемые кальмары были выловлены в северо-курильской зоне дальневосточного региона [1;2]. В конце 20 века в паразитофауне командорского кальмара наблюдались представители семи видов: нематоды *Anisakis sp.*, *Anisakis simplex*, *Thynnascaris sp.*, трематода *Derogenes varicus*, цестоды *Nybelinia sp.*, *Phyllobotrium sp.*, скребень *Echinorhynchus cotti*. В 2021 году в результате исследований ТИНРО было обнаружено 7 видов цестод *Phyllobotrium sp.*, *Nybelinia surmenicola*, *Nybelinia sp.*, *Scolex pleuronectis*, *Tentacularia sp.*, *Pelichnibotrium sp.*, *Tetraphyllidea gen. fam. sp.*, 2 вида нематод: *Anisakis simplex* и *Anisakis typica* [3].

Материалом для исследования послужили 22 экземпляра командорского кальмара, добытых ООО «РОСРЫБФЛОТ» в северо-курильской зоне дальневосточного региона и упакованных 24.12.2021 года. У кальмаров проводили оценку состояния наружных и внутренних покровов и органов. Помимо явных признаков патологий так же производили оценку зараженности паразитами. Обнаруженные паразиты были выделены с целью определения их видовой принадлежности. Так же были определены экстенсивность инвазии, интенсивность инвазии и индекс обилия, значения которых показывают зараженность организма паразитическими видами [4;5]. У командорского кальмара при паразитологическом исследовании обнаружено 19 мертвых личинок нематод, принадлежащих к роду *Anisakis*.

Изучали обсемененность бактериями кальмаров. Бактериологический посев осуществляли на рыбопептонный агар. После инкубирования посевов в термостате выделяли разнотипные колонии бактерий и пересеивали их на скошенный рыбопептонный агар, добиваясь чистоты культур. У чистых культур изучали культуральные признаки: степень развития и характер роста; форму колоний; размер колоний; край колоний; поверхность колоний; рельеф колоний; консистенцию колоний; прозрачность колоний; внутреннюю структуру колоний; пигментообразование; цвет колоний. [4;5] Морфологические признаки определяли путем окраски мазков по Граму. Для первичной идентификации бактерий применяли тест на оксидазу и тест на каталазу. Затем осуществляли постановку культур бактерий на дифференциально – диагностический ряд. Он состоял из следующих сред: полужидкий агар; рыбопептонная желатина; среда Клиглера; среда Хью-Лейфсона; среды Гисса с глюкозой, сахарозой, арабинозой, лактозой, мальтозой, маннитом; рыбопептонный агар; среда KNO₃; среда Кларка; среда для определения гидролиза эскулина. Идентификацию осуществляли изучением культуральных, морфологических, физиологических, биохимических признаков бактерий. Их определение до рода и вида осуществляли с помощью определителя бактерий Берджи [5,6].

Наружные покровы были обсеменены девятью видами бактерий, среди которых преобладали *Aeromonas media* (36,36%) и *Aeromonas hydrophilla* (26,37%). Внутренние покровы обсеменены семью видами бактерий, среди которых доминирующее положение занимают *Enhydrobacter aerosaccus*

(34,47%), *Aeromonas media* (33,28%) и *Aeromonas hydrophilla* (21,96%). Жаберный аппарат обсеменён восемью видами бактерий. Значительную долю занимали *Aeromonas media* (43,38%), *Aeromonas hydrophilla* (30,66%), *Streptococcus uberis* (16,53%). В нидаментальных (скурполовых) железах выявлено 3 вида бактерий. Большая обсемененность приходится на вид *Aeromonas hydrophilla* (64,52%) и *Aeromonas media* (33,55%). Микрофлора печени представлена четырьмя видами бактерий, из которых значительную долю (94,22%) составляет *Aeromonas media*. Кишечник обсеменен шестью видами, среди которых наибольшие доли занимают виды *Aeromonas hydrophilla* (39,29%), *Aeromonas media* (27,09%), *Streptococcus uberis* (22,67%). Микрофлора жаберного сердца представлена десятью видами, из которых наибольшая доля приходится на виды *Aeromonas caviae* (40,38%), *Streptococcus uberis* (39,77%), *Leisteria monocytogenes* (16,38%). Видовой состав бактерий чернильного мешка представлен двумя видами: *Aeromonas media* (50,46%) и *Aeromonas hydrophilla* (49,54%).

На основании проведенных исследований были получены следующие результаты:

- У командорского кальмара при паразитологическом исследовании обнаружено 19 мертвых личинок нематод, принадлежащих к роду *Anisakis*. Экстенсивность инвазии составляет 9%, интенсивность инвазии – 7-12 экз., а индекс обилия составил 1 паразит/особь.
- В микрофлоре кальмаров преобладали грамотрицательные бактерии. Микробиоценоз был представлен кокковыми бактериями.
- Бактерии рода *Aeromonas* доминируют в микробном пейзаже кальмара. Среди данного рода наиболее часто встречали *Aeromonas media* (более 39%). Наиболее обсеменены бактериями внешние покровы командорского кальмара. Во всех исследованных наружных и внутренних покровах, в органах доминировали аэромонады.

Исследование выполнено при поддержке ФГБОУ ВО «КГТУ»

Список литературы

- 1) Jereb P., Roper C.F.E. Cephalopods of the World an Annotated and Illustrated Catalogue of Cephalopod Species Known to Date Volume 2 Myopsid and Oegopsid Squids. Rome: Food and Agriculture Organization, 2010. P. 649.
- 2) Зуев Г.В., Нигматуллин Ч.М., Никольский В.Н. Нектонные океанические кальмары. М.: Агропромиздат, 1985. 224 с.
- 3) Зуев М.А., Мотора З.И. Гельминты командорского кальмара *Berryteuthis magister* района Северных Курильских островов // Морская биология в 21 веке: систематика, генетика, экология морских организмов. Владивосток, 2022. С. 143-144.
- 4) Авдеева Е.В., Казимирченко О.В., Котлярчук М.Ю. Методы диагностики болезней рыб. Часть 1. Диагностика инфекционных болезней рыб: учеб. пособие. Калининград: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2010. 110 с.
- 5) Головина Н.А. Ветеринарно-санитарная экспертиза гидробионтов. Лабораторный практикум. М: МОРКНИГА, 2010. 198 с.
- 6) Головина Н.А., Авдеева Е.В., Евдокимова Е.Б., Казимирченко О.В., Котлярчук М.Ю. Практикум по ихтиопатологии. М: МОРКНИГА, 2016. 417 с.

РАЗВИТИЕ ЛИЧИНОК *PHOLIS CRASSISPINA* (PERCIFORMES) В ВОДАХ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОГО МОРЯ

Ростовцева М.О.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: *Pholis crassispina*, залив Петра Великого, меланиновая окраска, скелет, стадии развития.

Семейство Pholidae в заливе Петра Великого представлено 5 видами: *Pholis crassispina*, *P. nebulosa*, *P. picta*, *P. fasciata* и *Rhodymenichthys dolichogaster*. При оценке биоразнообразия рыб Pholidae посредством изучения ихтиопланктона часто совершают ошибки в связи с тем, что не разработано надежных ключей для определения личинок данного семейства [1]. Согласно литературным источникам [2], в водах залива Петра Великого (ЗПВ) из видов рода *Pholis* с чешуей на голове обитает только *Pholis nebulosa*. В работе Черешнева и Назаркина [3] впервые сообщается об обнаружении в ЗПВ внешне похожего на *P. nebulosa*, вид – *P. crassispina*. Данная работа основана на обнаружении всего одного экземпляра.

Целью работы являлось описание личиночных стадий развития *P. crassispina* из вод ЗПВ. Материалом, положенным в работу, являлись личинки (TL 12,2–30,8 мм, $n = 44$ экз.), молодь и половозрелые особи *P. crassispina* (TL 91–175 мм, $n = 22$ экз.). Личинок собирали на световых станциях с наступлением вечерних сумерек до 01:00. Лов молоди и половозрелых рыб осуществлялся мальковым неводом. Для описания развития личинок были выделены следующие стадии: *yolk-sac* – стадия желточного мешка; *preflexion* – стадия перед загибом хорды; *flexion* – стадия загиба хорды; *postflexion* – стадия после завершения загиба хорды и формирования лучей в хвостовом, анальном и спинном плавниках. Для описания пигмента и степени развития скелета рыб окрашивали ализариновым красным и просветляли в 1,5-% КОН [4].

Для подтверждения наличия в водах залива Петра Великого вида *P. crassispina*, необходимо было определить значения основных меристических признаков взрослых рыб и неполовозрелой молоди. Размах изменчивости количества лучей в спинном, анальном плавниках и количества позвонков в туловищном и хвостовом отделах соответствует известным значениям, но из-за большого ареала значения в исследуемой акватории оказались уже [5]. Например, количество членистых лучей в анальном плавнике в заливе варьирует в пределах от 35 до 39, а значения для всего ареала – 34–41. По данным Ятсу [5] у *P. nebulosa* в грудном плавнике от 14 до 15 лучей, а у *P. crassispina* 12–13. В нашей выборке встречались рыбы только с 11–12 лучами. Следовательно, пойманные особи принадлежали виду *P. crassispina*.

Характерными признаками для стадии *yolk-sac* (TL 12,2–12,7 мм) являются прямой нотохорд и наличие желточного мешка. Личинки слабо пигментированы; меланофоров мало, но они крупные и не имеют четкой формы.

Стадия *preflexion* характеризуется следующими признаками (TL 14,2–18,4 мм): прямой нотохорд, окрашиваются только основания лучей анального, спинного и основные лучи хвостового плавников, тела позвонков (кроме последних 7 хвостовых) и их невральные отростки. Гипуральные кости, уростиль еще не окрашиваются ализарином, не сформированы краевые лучи хвостового плавника. Отмечается ряд наружных меланофоров на боках брюха и они немногочисленны. Постанальные вентральные меланофоры не соответствуют количеству членистых лучей анального плавника. На клейтруме присутствуют меланофоры.

Признаки стадии *flexion* (TL 20 – 25 мм): нотохорд загнут, окрашиваются гипуральные кости, уростиль, все позвонки (кроме последнего хвостового), нижние остистые отростки; развиты лучи в анальном, грудных и колючки в спинном плавниках; в хвостовом плавнике количество лучей

– 4+7+7+3. Лучи хвостового плавника направлены больше вниз, чем назад. Постанальные вентральные меланофоры соответствуют количеству членистых лучей в анальном плавнике. Хвостовой плавник более пигментированный. Ряд меланофоров на боках брюха значительно увеличился. С этой стадии в качестве основного диагностического признака у личинок можно использовать количество меланофоров в основании лучей анального плавника (35–39 у *P. crassispina*).

Характерные черты стадии *postflection* (TL 25 – 30,8 мм): загнутая назад вершина ното хорда; ализарином окрашиваются позвонки, остистые отростки, а также эпуралии. В хвостовом плавнике более пяти верхних краевых лучей, все лучи хвостового плавника направлены назад. Образуется мальковая окраска.

Исследованные личинки по количеству лучей в анальном, спинном, хвостовом и грудных плавниках, а также по количеству позвонков, расположению меланофоров не отличаются от взрослых рыб и неполовозрелой молодежи. Со стадии *flection* у личинок сформированы лучи в грудных плавниках, подсчет которых показал, что их 11-12. Все эти данные убедительно свидетельствуют, что исследованные личинки принадлежат к *P. crassispina*. От других видов сем. Pholodae они отличаются счетными признаками. Хорошим показателем здесь будут лучи в анальном плавнике. Так, у *R. dolichogaster* 40-51 лучей в анальном плавнике, у *P. picta* 45-48 и у *P. fasciata* 41-48 [5]. Наличие *P. nebulosa* в водах ЗПВ отмечено Линдбергом и Красюковой [2] нужно подтверждать на основе реальных данных об обнаружении особей этого вида.

Исходя из наших данных и данных работы Кимуры и др. [6] меланиновая пигментация личинок *P. nebulosa* и *P. crassispina* развивается сходным образом. В качестве диагностического признака *P. nebulosa* Кимура и др. [6] использовали нейтральный пигмент, который по их мнению должен отсутствовать у *P. crassispina*. Однако у 60 % особей *P. crassispina* на стадии *preflection* и на последующих стадиях в заливе Петра Великого данный пигмент присутствует у всех исследованных личинок. Поэтому данный признак в качестве диагностического использовать нельзя.

Работа выполнена при поддержке лаборатории ихтиологии НИЦМБ ДВО РАН.

Список литературы

- 1) Давыдова С.В. Видовой состав ихтиопланктона бухт залива Петра Великого и его сезонная динамика // Известия ТИНРО. 1998. Т. 123. С. 105–121.
- 2) Линдберг Г.У., Красюкова З.В. Рыбы Японского моря и сопредельных частей Охотского и Желтого морей. Часть 4. Ленинград: Наука, 1975. 464 с.
- 3) Черешнев И.А., Назаркин М.В. Первое достоверное обнаружение нового для фауны России вида маслюка *Pholis (Enedrias) crassispina* (pisces: Pholidae) в Северо-западной части Японского моря, с замечаниями по составу видов этого семейства в данном районе // Биология моря. 2008. Т. 34. №5. С. 318–323.
- 4) Якубовский М. Методы выявления и окраски системы каналов боковой линии и костных образований у рыб // Зоологический журнал. 1970. Т. XLIX. №. 9. С. 1398–1402.
- 5) Yatsu A. A revision of the gunnel family Pholididae // Bull. Natn. Sci. Mus. 1981. P. 165–190.
- 6) Kimura S., Okazawa T., Mori K. Development of Eggs, Larvae and Juveniles of the Tidepool Gunnel *Pholis nebulosa* // Nippon Suisan Gakkashi. 1987. № 54(7). P. 1161–1166.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ПРОПАГУЛ *LINUCHE* SP. (SCYPHOZOA, CORONATAE)

Салова И.А., Хабибулина В.Р., Домрачева М.М.

Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Scyphozoa, Coronatae, бесполое размножение, биология развития

Полипы Scyphozoa обладают множеством способов бесполого размножения, среди которых встречаются разные типы почкования, образование подвижных личинок и стробилиция [1]. У некоторых представителей отряда Coronatae есть особый тип бесполого размножения с помощью пропагул – небольших клеточных тел, которые развиваются в сцифистомы. Целью данной работы стало изучение особенностей строения и образования пропагул сцифистом рода *Linuche*.

Живые особи полипов *Linuche* sp. были получены в Аквариальной Лаборатории морских исследований ЗИН РАН и содержались в культуре при стандартной температуре 22°C, солености 34‰ и кормлении раз в неделю двухдневными науплиями *Artemia* spp. Образование пропагул наблюдалось при ухудшении качества воды вследствие гниения излишков кормовых объектов или при резком падении температуры ниже 20°C. Изучение строения пропагул проводилось с помощью световой и трансмиссионной электронной микроскопии.

Пропагулы образуются в результате неравномерной фрагментации полипа. При ухудшении условий полип втягивается в трубку, закрывает ее оперкулум тонкой крышечкой, редуцирует оральный конец с щупальцами и септы, а затем гастральную полость. При фрагментации от полипа отделяется клеточная масса, которая постепенно развивается в пропагулы. Их высвобождение происходит через отверстие в крышечке оперкулума, предположительно образующееся при выходе самих пропагул. В ходе наблюдений у пропагул не отмечается двигательная активность. Вероятно, они способны к движению только короткий промежуток времени, а затем оседают на дно и уже не перемещаются.

Внешне пропагулы представляют собой сферические тела диаметром от 100 до 450 μm . Они имеют различную окраску – от практически полностью белой с редкими бурыми вкраплениями до насыщенно бурой. Её интенсивность зависит от количества клеточных фотосимбионтов в пропагуле. На полутонких срезах пропагула выглядит как недифференцированная масса клеток без клеточных слоев. В её составе можно выделить клетки с активно делящимися симбионтами в вакуолях, нематоцисты того же типа, что и у полипов, и недифференцированные аморфные клетки, часть из которых содержит включения. При окраске срезов толуидином выявляется кислая природа этих включений. Трансмиссионная электронная микроскопия также не помогла установить наличие клеточных слоев у пропагулы, но с её помощью удалось обнаружить электронно-плотные включения, встречающиеся в некоторых недифференцированных клетках. По-видимому, клеточные слои обособляются позднее при развитии пропагулы в сцифистому, а многочисленные включения в клетках, вероятно, являются материалом для синтеза будущего перисарка.

Ранее также проводились исследования пропагул *Linuche unguiculata* [2], но их морфология и поведение отличались от наблюдаемых нами. Они более крупные и овальные, всегда с высоким содержанием симбионтов, обладают ресничками и активно перемещаются. При этом даже на ранних этапах развития у них выделялись различные слои эпидермиса и гастродермиса. Также их образованию не предшествовало какое-либо изменение условий содержания, и они отделялись при стандартных условиях и регулярном кормлении. Наличие такого типа размножения авторы связали с необходимостью постоянного расселения особей и увеличения их численности. К тому же, в водах, где были собраны живые образцы, практически отсутствовали как эфиры, так и взрослые медузы этого вида, поэтому данный тип размножения скорее всего является их основным способом распространения.

В нашем исследовании пропагулы *Linuche sp.* не перемещаются активно и зачастую обладают намного меньшими размерами, содержание симбионтов у них довольно часто является небольшим и клеточной дифференцировки на слои не происходит. Большинство из них в дальнейшем либо не развивается, либо резорбируется, а прикрепление и развитие происходит только у самых крупных пропагул с высоким содержанием симбионтов. Также их отделение мы наблюдали только при ухудшении условий. На основании этого мы можем предположить, что в разных условиях полипы рода *Linuche* способны отделять разные типы пропагул, служащие в первую очередь для разных целей. В благоприятных условиях они нужны для расселения и зачастую жизнеспособны, а в неблагоприятных являются средством спасения популяции и далеко не всегда способны к дальнейшему развитию. По-видимому, наибольшей вероятностью успешного развития обладают крупные пропагулы (от 400 μm), имеющие большое количество клеток с фотосимбионтами. Для отделения таких пропагул материнский организм должен обладать достаточным количеством ресурсов, которые не всегда накапливаются к моменту резкого ухудшения условий. Вследствие этого часть отделившихся в неблагоприятных условиях пропагул имеет низкую жизнеспособность.

Работа выполнена с использованием оборудования РЦ СПбГУ «Культивирование микроорганизмов» и ЦКП «Таксон» ЗИН РАН

Список литературы

- 1) Adler, L., Jarms, G. New insights into reproductive traits of scyphozoans: special methods of propagation in *Sanderia malayensis* GOETTE, 1886 (Pelagiidae, Semaestomeae) enable establishing a new classification of asexual reproduction in the class Scyphozoa // Marine Biology. 2009. Vol. 156. N. 7. P. 1411-1420.
- 2) Silveira, F., Morandini, A. Asexual reproduction in *Linuche unguiculata* (Swartz, 1788) (Scyphozoa: Coronatae) by planuloid formation through strobilation and segmentation // Proceedings of the biological society of Washington. 1998. Vol. 111. N. 4. P. 781-794.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И БИОМАССЫ ТИХООКЕАНСКОГО КАЛЬМАРА В ТИХООКЕАНСКИХ ВОДАХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД 2019–2022 ГГ.

Самойлова Д.П.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток

Ключевые слова: *Todarodes pacificus*, тихоокеанский кальмар, изменчивость распределения, изменчивость запаса, Курильские острова

Тихоокеанский кальмар (*Todarodes pacificus*) составляет основу промысловых запасов головоногих моллюсков в Японском море и тихоокеанских водах Японии и его промысел ведёт ряд стран, включая Российскую Федерацию [1, 2]. Работа по изучению изменчивости распределения и биомассы тихоокеанского кальмара имеет прямое значение при планировании сроков и объёмов промысла, чтобы грамотно осваивать морские ресурсы, не препятствуя восстановлению их популяции. Выделяют 4 субпопуляции с разными пиковыми сезонами нереста: осеннюю, зимнюю, весеннюю и летнюю, причем два первых являются самыми многочисленными и наиболее важными для промысла [1, 3].

В данной работе, в основном, будет рассмотрена зимняя субпопуляция, наиболее многочисленная в Южно-Курильском районе (ЮКР) [4], где ведёт промысел Российская Федерация, изучены особенности распределения, оценён запас нагульных скоплений и изменчивость данных параметров. Материалами для данной работы послужили данные семи пелагических траловых съёмок верхней эпипелагиали, выполненных в 2019 г. и июне-июле и августе-сентябре 2020–2022 г. в прикурильских водах и прилегающих открытых водах Тихого океана. В августе-сентябре 2019 г. съёмка в данном районе не проводилась. Данные собирались в рейсах НИС «Профессор Кагановский» и НИС «ТИНРО».

В июне-июле 2019 г. распространение тихоокеанского кальмара в Южно-Курильском районе носило локальный характер и было приурочено к смешанным водам субтропического происхождения, вдоль южной границы Субарктического фронта, а потому было сосредоточено в юго-восточной и восточной частях района к югу от 44° с. ш.

В июне-июле 2020 г. распространение тихоокеанского кальмара было аналогичным, но к югу 45° с. ш., что может быть связано с увеличением северного переноса вод Субарктическим течением. Встречались в основном мелкие особи (длина мантии 11–14 см), в отличие от других годов, где преобладали крупные особи (19–29 см). В августе-сентябре 2020 г. по мере прогрева вод вид распространился практически по всей обследованной акватории к югу от 46° с. ш. При этом частота встречаемости выросла до 54,2% против 10,8%.

В 2021 г. распределение тихоокеанского кальмара было аналогичным с 2020 г., при этом средний размер в данный год уменьшился с 16,7 до 15,9 см. В августе-сентябре 2021 г. распределение температуры воды на поверхности характеризовалось наличием двух пятен холодной воды, что можно объяснить затоком более холодных вод из Охотского моря через проливы. Вследствие этого численность в 2021 г. была ниже показателей 2019–2020 г. и 2022 г.

В июне-июле и августе-сентябре 2022 г. температура была ниже из-за более интенсивного вклада течения Ойасио. Вследствие этого численность в 2022 г. была ниже показателей 2020–2021 г.

В июне-июле 2019 г. и 2021 г. встречались в основном крупные особи (длина мантии 19–23 см). В июне-июле 2020 г. встречались в основном мелкие особи (11–14 см), что может быть связано с более поздним началом нереста. В июне-июле 2022 г. встречались в основном особо крупные особи (27–29 см).

В августе-сентябре 2020 г. встречались в основном крупные особи (19–21 см). В августе-сентябре 2021 г. встречались в основном мелкие особи (7–10 см). В августе-сентябре 2022 г. встречались в основном особи средних размеров (13–15 см).

В ходе исследования выявлена сезонная изменчивость в распределении тихоокеанского кальмара в прикурильских водах. По мере прогрева вод кальмары мигрируют в исключительную экономическую зону России из открытых вод Тихого океана к Курильским островам. При этом увеличивается встречаемость кальмара за счёт миграций.

Межгодовая изменчивость в размерном составе тихоокеанского кальмара связана со сроками начала нереста и наличием особей весенней (мелкой) или осенней (крупной) группировки. По нашим данным раньше всего нерест начался в 2022 г., позже всего – в 2021 г. Сезонная изменчивость размерного состава тихоокеанского кальмара является следствием его роста – к августу-сентябрю увеличивается средний размер мантии. Исключением являлся 2021 г. – средний размер кальмара снизился с 16,7 см до 15,9 см. По-видимому, это объясняется откочёвкой кальмара в воды Японии в связи с ранним началом нереста, отчего в июне-июле в водах преобладали взрослые особи, а в августе-сентябре уже появилась молодь весенней когорты. Аналогично с 2021 г. в 2022 г. средний размер уменьшился с 18,3 см до 16,1 см из-за слишком позднего начала нереста, когда в июне-июле ещё встречалась осенняя группировка, а зимняя ещё полноценно не мигрировала.

Межгодовая изменчивость оценок запаса тихоокеанского кальмара зависит от вклада холодного течения Ойясио (уменьшает запас) и тёплого течения Куроисио (увеличивает запас) и сроков нереста, с которыми связана миграция кальмара в исследуемом районе.

Материал был предоставлен сектором изучения кальмаров Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» («ТИНРО»).

Список литературы

- 1) Мокрин Н.М. Экология и перспективы промысла тихоокеанского кальмара (*Todarodes Pacificus*) в Японском море: дис. ... канд. биол. наук: Владивосток, 2006. 156 с.
- 2) Савиных В.Ф. Основные результаты исследований пелагических рыб и кальмаров в ТИНРО-Центре // Изв. ТИНРО. 2005. Т. 141. С. 146–172.
- 3) Шевцов Г.А. Тихоокеанский кальмар – *Todarodes pacificus* Steenstrup, 1880 (Cephalopoda, Ommastrephidae) северо-западной части Тихого океана (биология, распределение, состояние запасов): автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 1978. 24 с.
- 4) Шунтов В.П., Бочаров Л.Н. Атлас количественного распределения nekтона в северо-западной части Тихого океана // Национальные рыбные ресурсы. 2005. Т. 3. С.142–143.

ОБИЛИЕ И ВИДОВОЙ СОСТАВ ЛЕДОВЫХ И ПЛАНКТОННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО ДАННЫМ РЕЙСА НИС «ДАЛЬНИЕ ЗЕЛЕНЦЫ» (ИЮЛЬ 2023 Г.)

Сашова О.А.¹, Коновалова О.П.²

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

²ООО "Центр морских исследований МГУ им. М. В. Ломоносова г. Москва

Ключевые слова: фитопланктон, ледовая флора, Карское море, Баренцево море.

Баренцево море относится к наиболее продуктивным среди шельфовых морей Арктики, что обусловлено присутствием разнообразных пелагических и донных фитоценозов и особыми условиями потока и трансформации биогенных элементов. Существенный вклад в годовую первичную продукцию вносит криофлора, на её долю приходится около 13% [1].

Западная часть Карского моря включает глубоководные районы желоба Св. Анны и Новоземельской впадины. В районе Новоземельской впадины отмечено присутствие видов, характерных для открытых вод Арктики, что свидетельствует о наличии водообмена между Арктическим бассейном и юго-западной частью Карского моря [2].

Видовое богатство планктонных и ледовых водорослей Баренцева моря существенно выше, чем в Карском море [3, 4]. Состав ледовых диатомовых водорослей Карского моря схож с составом криофлоры Баренцева моря, что, вероятно, обусловлено поступлением вод и дрейфом льдов из Баренцева моря в Карское [3].

Целью данной работы являлось изучение видового состава, количественных показателей ледовых и планктонных микроводорослей и распределения хлорофилла *a* в северо-восточной части Баренцева моря и в западной части Карского моря.

Материал для исследования был собран в ходе экспедиции НИС «Дальние Зеленцы» по программе «Плавающий университет» МФТИ-ИО РАН в июле 2023 года. Район исследований включал разрушенное ледовое поле в западной части Карского моря (район I) и прикромочную зону в северо-восточной части Баренцева моря (район II). Станции отбора проб располагались среди льдин и по мере удаления от ледяных полей. Фрагменты льда собирали при помощи ихтиологической сети и растапливали с добавлением профильтрованной морской воды. Талую воду и пробы воды с поверхности концентрировали согласно протоколу [5] и фиксировали формалином. Определение содержания хлорофилла *a* и феофитина *a* проводили флуориметрическим методом [6].

В районе I значения температуры и солености изменялись в диапазоне от 1,2 до 6,9°C (среднее – 3,9±0,4°C) и от 10,9 до 24,9 PSU (среднее – 20,4±1 PSU), соответственно. В районе II температура варьировала от -0,5 до 4,3°C, составляя в среднем 2±0,3°C, соленость изменялась в пределах 30,2–34,5 PSU, в среднем – 31,4±0,2 PSU. Концентрация хлорофилла в западной части Карского моря в поверхностном горизонте изменялась в пределах от 0,01 до 0,34 мг/м³ (среднее – 0,11±0,02 мг/м³), в фрагментах льда варьировала от 0,07 до 0,23 мг/м³. В северо-восточной части Баренцева моря концентрация хлорофилла была заметно ниже и варьировала от 0,01 до 0,09 мг/м³ (среднее – 0,04±0,004 мг/м³), в образцах льда значения изменялись от 0,05 до 0,32 мг/м³. Таким образом, содержание хлорофилла *a* было выше в образцах льда, чем в поверхностном слое воды.

По результатам корреляционного анализа выявлена положительная корреляция между концентрацией хлорофилла и температурой ($r_s=0,47$; $p<0,001$). Концентрация хлорофилла была обратно пропорциональна солености, однако эта зависимость была недостоверна ($r_s=-0,14$; $p>0,05$).

Таксономический состав криофлоры исследуемых районов составил 30 таксонов, из которых было идентифицировано до вида 15 диатомей, 5 динофлагеллят, 2 вида зелёных водорослей и 1 вид гаптофитовых водорослей. Кроме того, в состав входили неидентифицированные кокки и жгутиковые формы.

Численность и биомасса криофлоры в Баренцевом море варьировали от 25,93 до 2129,01 тыс. кл/л и от 0,08 до 21,58 мг С/л, соответственно. В Карском море значения были заметно ниже и составили 10 тыс. кл/л и 0,02 мг С/л. В составе ледовых сообществ доминировали диатомовые водоросли, их вклад в общую численность и биомассу достигал 90% и 80% соответственно. Среди диатомей преобладали пеннатные виды. Среди динофлагеллят заметный вклад в биомассу вносила *Protoperidinium pellucidum*, её доля составила 10% от общей биомассы. Наиболее часто встречались *Cylindrotheca closterium*, *Nitzschia frigida*, *Nitzschia sp.*, *Fragilariopsis oceanica*, цисты динофитовых водорослей и кокколитофорида *Gephyrocapsa huxleyi*.

В поверхностном слое приледной воды в обоих морях видовое разнообразие и количественные показатели были ниже, чем в образцах льда. В Баренцевом море в составе фитопланктона было определено 8 видов динофитовых водорослей. Среди диатомей была встречена только пеннатная водоросль *Fragilariopsis oceanica*, среди гаптофитовых – кокколитофорида *Gephyrocapsa huxleyi*. Численность и биомасса изменялись от 6,72 до 32,8 тыс. кл/л и от 0,06 до 0,26 мг С/л, соответственно. В Карском море было идентифицировано 3 вида диатомей, 4 вида динофлагеллят и 1 вид гаптофитовых водорослей. Численность и биомасса варьировали от 26,4 до 34,83 тыс. кл/л и от 0,033 до 0,044 мг С/л, соответственно. Основной вклад в биомассу фитопланктона в поверхностном слое обоих морей вносила динофлагеллята *Protoperidinium pellucidum* (37% в Баренцевом море и 34% в Карском море).

Работа выполнена в рамках научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

Список литературы

- 1) Макаревич, П. Р. Первичная продукция Баренцева моря / Макаревич, П. Р. // Вестник Мурманского государственного технического университета. – 2012. – Т. 15. – №. 4. – С. 786-793.
- 2) Зацепин, А. Г. и др. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г / Зацепин, А. Г. [и др.] // Океанология. – 2010. – Т. 50, № 5. – С. 683-697.
- 3) Ильяш, Л. В., Житина, Л. С. Сравнительный анализ видового состава диатомовых водорослей льдов морей Российской Арктики / Ильяш, Л. В., Житина, Л. С. // Журнал общей биологии. – 2009. – Т. 70, № 2. – С. 143-154.
- 4) Poulin, M. et al. The pan-Arctic biodiversity of marine pelagic and sea-ice unicellular eukaryotes: a first-attempt assessment / Poulin, M. et al. // Marine Biodiversity. – 2011. – Т. 41. – С. 13-28.
- 5) Радченко, И. Г. Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона. Учебно-методическое пособие для студентов биологических специальностей университетов / Радченко, И. Г., Капков, В. И., Федоров, В. Д. – М.: Мордвинцев. – 2010. – С. 60.
- 6) HolmHansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology / HolmHansen, O. // Oikos. – 1978. – V. 30. – P. 438-447.

ВНУТРИВИДОВАЯ СТРУКТУРА КИЖУЧА (*ONCORHYNCHUS KISUTCH* WALBAUM) НА АЗИАТСКОЙ ЧАСТИ АРЕАЛА

Сошникова В.А.¹, Пильганчук О.А.², Зеленина Д.А.¹

¹ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Москва

²Камчатский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии» («КамчатНИРО»), Петропавловск-Камчатский

Ключевые слова: кижуч, микросателлиты, генетическое разнообразие, полиморфизм ядерных локусов, митохондриальная ДНК, филогеография

Кижуч (*Oncorhynchus kisutch* Walbaum) – один из ценнейших объектов рыболовства и искусственного воспроизводства на Дальнем Востоке. Ареал вида довольно широк и включает в себя следующие территории: на западе Тихого океана – от Чукотки до Северной части Хабаровского края, в том числе остров Сахалин и северные острова Курильской гряды, на востоке – от Аляски до Калифорнии [1]. В пределах азиатской части ареала кижуч является третьим-четвертым по численности видом рода *Oncorhynchus*, при этом на Северных Курилах этот вид занимает второе место, уступая лишь горбуше (*Oncorhynchus gorbuscha*).

Изучен полиморфизм двух фрагментов митохондриальной ДНК - контрольного региона (D-loop) и гена цитохрома В, а также десяти микросателлитных локусов (Oki10, One114, OtsG68, OtsG78b, OtsG83b, OtsG253b, OtsG422, OtsG423, AMPCX, CWDDD)[2-4]. Было исследовано 16 выборок кижуча из различных азиатских рек Северной Пацифики, а также морская выборка из залива Аляска (всего 687 особей).

Уровень внутривидового митохондриального полиморфизма D-loop выявил невысокое генетическое разнообразие с одним массовым гаплотипом, и пятью другими, отличающимися от массового на одну замену (гаплогруппа h2), а также двумя, относящимися к иным гаплогруппам (h1 и h4). Интересно, что, согласно литературным данным [2] в реках североамериканского побережья наблюдается тот же массовый гаплотип (гаплогруппа h2), который не является единственным. По частоте на втором месте встречаются гаплотипы гаплогруппы h3, а также, более редко, наблюдаются гаплотипы групп h1 и h2.

Внутривидовой митохондриальный полиморфизм по гену цитохрома В представлен 25 гаплотипами, разбитыми на три гаплогруппы, при этом самым массовым является гаплотип A1 (центральный в гаплогруппе А, также включающей в себя 13 гаплотипов, отличающихся от A1 на одну замену). Гаплотипы гаплогруппы В (9 последовательностей, отличающихся от гаплогруппы А на 5-7 замен) не были обнаружены у особей, нерестящихся в реках о. Сахалин, при этом отмечены в нагульных скоплениях залива Аляска, наряду с гаплогруппой А. Гаплотипы группы С, выявленные в нагульных скоплениях залива Аляска, не обнаружены у азиатского кижуча, однако встречаются на североамериканском континенте.

Анализ митохондриальной ДНК кижуча азиатских стад выявил крайне низкий уровень генетического полиморфизма, который не свойственен виду в целом, а является характерной особенностью популяций азиатской части ареала. Наличие в заливе Аляска гаплотипа группы С, занимающего промежуточное положение между двумя основными гаплогруппами, дополнительно подтверждает концепцию последовательного расселения вида из Каскадийского рефугиума, учитывая то, что ранее этот гаплотип регистрировали в южной части Британской Колумбии, расположенной в начале маршрута постледниковых миграций вида. Учитывая значительно более высокий уровень генетического полиморфизма в южных регионах североамериканского побережья, можно объяснить обнаруженный нами низкий внутривидовой полиморфизм азиатского кижуча именно эффектом основателя при формировании азиатских популяций, а не особенностью вида в целом. Микросателлитный анализ был проведен по 10 высокополиморфным локусам, которые позволили

уверенно различить популяции кижуча по региональному принципу и выделить три основных генетических кластера: сахалинский, североохотоморский и камчатский. Внутри камчатского кластера было отмечено дополнительное разделение на две подгруппы – собственно, полуострова Камчатка и популяции реки Апука, расположенной на материковом побережье к северо-востоку от полуострова. Результаты, полученные путем применения двух статистических подходов – метода многомерного шкалирования и байесовского кластерного анализа, коррелируют между собой. В настоящий момент проводятся геномные исследования (ddRAD-секвенирование), позволяющие осуществить поиск и подбор однонуклеотидных полиморфизмов (SNP), получить новые ядерные маркеры, в том числе и адаптивные, и тем самым более детально исследовать популяционную структуру вида.

Комплекс данных исследований представляет собой первое полномасштабное генетическое изучение кижуча азиатских стад, охватывающее практически весь его ареал. Изученные генетические характеристики популяций кижуча найдут свое применение для идентификации рыб в смешанных нагульных и преднерестовых скоплениях, а также при изучении миграционных путей в морской период жизни. Полученные знания будут использованы для рациональной эксплуатации вида с учетом сохранения природного биоразнообразия. Кижуч – ценный объект рыбного промысла, при этом также является распространенным объектом мировой лососевой аквакультуры. Таким образом, проведенные генетические исследования азиатских стад кижуча могут стать важным этапом, способствующим его искусственному воспроизводству на Дальнем Востоке.

Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ «ВНИРО», при поддержке гранта Минобрнауки РФ (соглашение № 075-15-2021-1084) и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 18-04-01375-а).

Список литературы

- 1) Зорбиди Ж.Х. Кижуч азиатских стад. // Петропавловск-Камчатский: КамчатНИРО. 2010. 206 с.
- 2) Smith C.T., Nelson R.J., Wood C.C., Koop B.F. Glacial biogeography of North American coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) // *Mol. Ecol.* V. 10. 2001. P. 2775–2785.
- 3) Olsen, J. B., Wilson, S. L., Kretschmer, E. J., Jones, K. C., Seeb, J. E. Characterization of 14 tetranucleotide microsatellite loci derived from sockeye salmon // *Molecular Ecology.* V. 9(12). 2000. P. 2185-2187.
- 4) Nakamura, Y., Shigenobu, Y., Sugaya, T., Kurokawa, T., Saitoh, K. Automated screening and primer design of fish microsatellite DNA loci on pyrosequencing data // *Ichthyological research.* V.60. 2013. P. 184-187.
- 5) Williamson, K. S., Cordes, J. F., May, B. Characterization of microsatellite loci in Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) and cross-species amplification in other salmonids // *Molecular Ecology Notes.* V. 2(1). 2002. P. 17-19

ОРНИТОФАУНА КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПОПУТНЫХ СУДОВЫХ УЧЕТОВ В 2022-2023 ГГ.

Таганова М.М.

Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: орнитофауна, Карское море, попутные судовые учеты, численность, сезонное распределение

Арктический регион является сложным для проведения орнитологических работ и, несмотря на ряд исследований, орнитофауна Карского моря до сих пор остается недостаточно изученной, в том числе существуют пробелы в описании распределения морских птиц в позднеосенний и предзимний период.

Орнитологические учеты в акватории Карского моря были проведены по маршруту следования 89-го и 92-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в период с 24 сентября по 06 октября 2022 г. и с 07 по 30 октября 2023 г. Работа велась при благоприятных погодных условиях в светлое время суток с палубы ходового мостика или с пеленгаторной палубы. Регистрация птиц выполнялась трансектным методом [1]. При движении судна особи фиксировались в 600-метровой полосе учета; при работе на станциях и в заливах - в 300-метровой полосе вокруг судна. Птицы, составляющие кильватерное сообщество, учитывались один раз в час. Регистрация велась как невооруженным взглядом, так и с помощью бинокля; производилась фотосъемка. Для идентификации птиц использовались полевые определители.

Основу учтенной орнитофауны Карского моря в оба сезона составили следующие отряды: Гусеобразные *Anseriformes*, Ржанкообразные *Charadriiformes* и Буревестникообразные *Procellariiformes*. При этом несмотря на то, что видовой состав в осенний (2022) и предзимний сезон (2023) остался практически неизменным, в 2023 году было отмечено снижение более чем в три раза средней плотности птиц на квадратный километр. Долевое участие основных групп птиц также изменилось – исчезло ярко выраженное в 2022 году численное доминирование морских водоплавающих птиц из отрядов гусеобразные и гагарообразные, а доля птиц-мигрантов, зимующих вдали от побережий и кочующих вблизи льдов, выросла.

В предзимний период 2023 года наиболее многочисленной группой оказался подотряд Чистиковые *Alcidae*: самыми массовыми были чистик *Cerphus grylle* (Linnaeus, 1758) и толстоклювая кайра *Uria lomvia* (Linnaeus, 1758). Места повышенной концентрации чистика находились в восточной и юго-восточной части моря, наиболее часто данный вид наблюдался в районах кромки льда или активного льдообразования. Толстоклювая кайра встречалась единично на всех акваториях, прилегающих к восточному побережью Новой Земли. Повышенная плотность кайры была отмечена в районе работ судна в Новоземельской впадине на юго-западе Карского моря и в проливе Карские ворота – данные акватории, судя по литературным данным, служат местом осенних кочевков этого вида [2]. Все встречи люрика *Alle alle* в 2023 году произошли в северо-восточной части Карского моря за 78° СШ, наибольшая численность зафиксирована в районе о-ва Визе. Общее распределение подотряда Чистиковые на акватории учетов не изменилось с 2022 года.

По абсолютному количеству особей в предзимний период лидировал глупыш *Fulmarus glacialis* (Linnaeus, 1761) – представитель отряда Буревестникообразные, который осенью занимал лишь четвертое место по численности. Средняя плотность данного вида снизилась меньше всего, а доля его в учетах выросла с 11% до 25%. При этом в предзимний период наблюдалось явное смещение ареала на юго-запад. В литературе имеются различные данные по распространению и обилию глупыша в пелагической части Карского моря в разные сезоны, но в основном авторы, проводившие учеты в летнее время, пишут о редкости встреч этого вида [3,4]. Однако, судя по всему, с окончанием сезона размножения птицы с баренцевоморских мест гнездования активно

откочевывают на открытые пространства Карского моря, включая прикромочные районы около 80°СШ [3,5], и уже в конце августа – начале сентября картина становится близка к той, которая наблюдалась в данном исследовании в 2022-2023 годах. Вполне возможно, что в осеннее время здесь велико влияние ювенальной миграции молодых особей [2].

Долевое участие семейства Чайковых *Laridae* в предзимних учетах по сравнению с осенними осталось практически одинаковым, хотя общая плотность снизилась, как и у остальных групп птиц. Наиболее многочисленным видом чаек в 2023 году была моевка *Rissa tridactyla* (Linnaeus, 1758), которая доминировала и в прошлом году. Птицы этого вида встречались в юго-западной части моря и у побережий Новой Земли, самые северные встречи были зафиксированы неподалеку от о-ва Визе. В тех же районах встречался и бургомистр *Larus hyperboreus* Gunnerus, 1767: поодиночке в пелагической части моря и небольшими стаями у побережий. Занесенная в Красную книгу РФ белая чайка *Pagophila eburnea* (Phipps, 1774) в предзимний период встретила четыре раза: на северо-западе от о-ва Ушакова в районе ледовой кромки, а также немного восточнее о-ва Визе.

Распространение птиц из отрядов Гусеобразные *Anseriformes* и Гагарообразные *Gaviiformes* в предзимний сезон сместилось на юго-запад. Места наибольших концентраций морских водоплавающих птиц совпали в оба года – стаи морянок *Clangula hyemalis* (Linnaeus, 1758), турпана *Melanitta fusca* (Linnaeus, 1758), обыкновенных гаг *Somateria mollissima* (Linnaeus, 1758) и гаг-гребенушек *Somateria spectabilis* (Linnaeus, 1758) отмечались в районе западных побережий о-ва Белый и п-ва Ямал и в проливе Карские ворота. Данные акватории являются частью Восточно-атлантического пролетного пути; кроме этого, для некоторых морских водоплавающих видов птиц побережья Карского моря могут служить местом линьки, однако этот вопрос требует дальнейших исследований [6].

Финансирование работы осуществлялось за счет госзадания Института океанологии им.П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0007.

Список литературы

- 1) Gould P.J., Forsell D.J. Techniques for shipboard surveys of marine birds // US Fish and Wildlife Service. 1989. №. 25.
- 2) Андреев В. А. и др. Миграции птиц Северо-Запада России. Неворобьиные. 2016. СПб.: Изд-во АНОЛА Професионал. 655 с.
- 3) Болдырев С. Л. Результаты судовых наблюдений птиц в западном секторе Российской Арктики в 2020-2021 годах // Русский орнитологический журнал. 2022. Т. 31. №. 2244. С. 4833–4842.
- 4) Дмитриев А. Е., Емельченко Н. Н., Слодкевич В. Я. Птицы острова Белого // Фауна Урала и Сибири. 2006. №. 11. С. 57–67.
- 5) Decker, M.B., Gavriilo, M., Mehlum, F., Bakken, V. 1998. Distribution and abundance of birds and marine mammals in the eastern Barents Sea and the Kara Sea, late summer 1995 // Norsk Polarinstitut Meddelelser nr. 1998. №155.
- 6) Краснов Ю. В. и др. Численность и сезонное распределение западной популяции гаги-гребенушки (*Somateria spectabilis*), организация мониторинга в северных морях России // Зоологический журнал. 2020. Т. 99. №. 1. С. 45–56.

ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРТОНИНЕРГИЧЕСКОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ У ПОЗДНИХ ЛИЧИНОК МОРСКИХ ЕЖЕЙ *MESOCENTROTUS NUDUS*

Танкович А.Е.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: биология развития, морские ежи, нервная система, личиночное развитие

Одной из характерных особенностей морских ежей является формирование в ходе личиночного развития двух независимых нервных систем: личиночной и дефинитивной. Личиночная нервная система возникает во время эмбриогенеза из нейрогенной эктодермы и полностью исчезает в ходе метаморфоза, не принимая участия в образовании дефинитивной нервной системы, которая формируется в зачатке будущего взрослого животного. В литературе достаточно много информации о развитии личиночной нервной системы у морских ежей. В частности, описано развитие дофаминергической, серотонинергической и ГАМКергической, а так же — пептидергических (S1 и S2) систем в нервной системе личинок морских ежей из отрядов *Odontophora* и *Irregularia*. Однако все подобные работы касаются, главным образом, анатомии нервной системы, либо посвящены исследованию молекулярных механизмов формирования нервной системы у ранних личинок морских ежей. Доступная же в литературе информация о развитии дефинитивной нервной системы в ходе личиночного развития весьма разрозненна и, зачастую, ограничивается описанием отдельных структур, в то время как данные по их развитию и взаимодействию довольно скудны. Более того, большинство работ, посвященных формированию дефинитивной нервной системы в ходе личиночного развития морских ежей, выполнены в начале XX века и требуют уточнения с использованием современных методов исследования.

Целью настоящего исследования явилось описание организации серотонинергической нервной системы у поздних, 8-руких и компетентных, т.е. способных к метаморфозу, личинок морских ежей *Mesocentrotus nudus*.

Проведенное исследование 8-руких и компетентных личинок морских ежей *M. nudus* показало наличие у личинок хорошо развитой серотонинергической нервной системы. Отмечены скопления серотонинергических нейронов в апикальном и оральном ганглиях. Нервные тракты, покидающие апикальный ганглий, простирались вдоль ресничных шнуров, расположенных на руках, и, разветвляясь, — вдоль основания эпидермиса, покрывающего бластоцель. У поздних 8-руких и компетентных личинок отмечены нервные тракты, проходящие в основании ресничных шнуров, расположенных в основании эполет. Серотонинергических нейронов на протяжении всего развития в зачатке взрослого ежа у 8-руких и компетентных личинок *M. nudus* не отмечено. Не отмечено также связи между личиночной и дефинитивной нервными системами. Полученные в ходе данной работы результаты подтверждают как наши собственные данные, полученные на личинках морских ежей *Scaphechinus mirabilis* и *Strongylocentrotus intermedius*, так и данные литературы о том, что у взрослых морских ежей серотонинергическая нервная система либо отсутствует полностью, либо редуцирована до нескольких нейрональных популяций.

Данная работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект №24-24-00380).

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ОСТРОВА РУССКИЙ (ЗАЛИВ ПЕТРА ВЕЛИКОГО, ЯПОНСКОЕ МОРЕ).

Тевс К.О.¹, Шевченко О.Г.²

¹Научно-образовательный комплекс «Приморский океанариум» – филиал Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: фитопланктон, доминирующие виды, пространственное распределение.

Значительное влияние на пространственное распределение микроводорослей оказывают поверхностные течения. Остров Русский подвержен влиянию вод смежных заливов Амурского и Уссурийского, соединенных проливами: на северо-западе – Босфор Восточный, на юго-востоке – Старка. В формировании течений в Уссурийском и Амурском заливах участвуют речной сток, морские течения и ветровые явления [1]. Посредством циклонического круговорота осуществляется водообмен между северной и южной частями заливов. Большое влияние на циркуляцию вод оказывает водообмен через проливы. В прол. Босфор Восточный действуют постоянные поверхностные течения, идущие из Амурского залива в Уссурийский вдоль северного берега пролива, и из Уссурийского залива в Амурский вдоль южного берега [2], в проливе Старка течения направлены на север [3]. Однако, вихревая структура течений в зал. Петра Великого неустойчива и может меняться в течение от 1 до 10 суток, меняя как скорость, так и структуру в верхнем квазиоднородном слое.

В основу работы легли планктонные сборы, выполненные в сентябре 2018–2019, в июне и июле 2020 гг. на 15 станциях, расположенных в прибрежной зоне о-ва Русский. Пробы отбирали с катера 5-ти литровым батометром Нискина с горизонта 0,5 м. Доминирующими считали виды, численность которых составляла не менее 20% от общей численности всех видов в сообществе. В качестве исходных данных для статистического исследования применены данные численности фитопланктона. Для определения сходства сообществ использовался коэффициент Брэя-Кертиса. В программе Past проведен кластерный анализ методом невзвешенного парного среднего (UPGMA), в качестве меры сходства использован индекс сходства Брэя-Кертиса.

Ветровая обстановка в сентябре 2018 г. характеризовалась преобладанием северо-западных ветров (1–12 м/с), в сентябре 2019 г. – юго-восточных (2–6 м/с). В июне–июле 2020 г. ветровая обстановка не имела стабильности [4].

Для анализа сходства/различия флоры отдельных районов исследования были построены дендрограммы, по видовому составу станции объединились в два кластера. В 2018 г. при уровне сходства 40%, объединились станции расположенные в западной, юго-западной части побережья о-ва Русский, отличительной особенностью было массовое развитие комплекса видов рода *Thalassiosira*. На остальных станциях доминировали виды рода *Cyclotella*. В 2019 г. первый кластер был сформирован станциями, расположенными в Амурском заливе, доминировали в планктоне *Thalassiosira nordenskioeldii* и *Teleaulax amphioxeia*. Во-вторую группу вошли станции Уссурийского залива, в этом районе отмечали массовое развитие *Skeletonema dohrnii*. В 2020 г. также выделялись два кластера. Массовое развитие *S. dohrnii* наблюдали в июне на всей исследуемой акватории, в июле только в Уссурийском заливе и прол. Босфор Восточный. В июне отличительной особенностью первого кластера, объединившего станции прол. Босфор Восточный было доминирование комплекса видов рода *Thalassiosira*, на остальных станциях преобладали *Pseudo-nitzschia delicatissima*, виды рода *Chaetoceros*. В июле на станциях в Уссурийском заливе и прол. Босфор Восточный значительного развития в сообществе достигал *Prorocentrum triestinum*. В остальных частях района исследования доминировали мелкие жгутиковые водоросли.

Пространственное распределение доминирующих видов в 2018 г. согласовалось с схемой ветровых течений при северо-западных ветрах; воды Амурского залива через пролив Старка доходили до п-ова Шкота. В сентябре 2019 г. *S. dohrnii* доминировала в планктоне восточного побережья, омываемого Уссурийским заливом; *T. nordenskioldii* и *T. amphioxeia* в массе развивалась в Амурском заливе. При преобладании юго-восточных ветров, воды Уссурийского залива заходят в Амурский залив, пространственное распределение микроводорослей в 2019 г. также подтверждало схему ветровых течений вокруг о-ва Русский.

В июне–июле 2020 г. картина распределения видов-доминантов отличалась от ситуации, характерной для сентября. В начале лета на большинстве станций отмечали развитие *S. dohrnii*. В июне *P. delicatissima* доминировала на значительном числе станций в Амурском и Уссурийском заливах, в июле – *P. triestinum*; на отдельных станциях преобладали мелкие жгутиковые водоросли.

Пространственное распределение микроводорослей также зависит и от биологии видов. Одним из факторов, обуславливающих массовое развитие и широкое распространение микроводорослей, может служить наличие покоящихся стадий, которые у диатомовых отмечены для видов родов *Skeletonema* и *Pseudo-nitzshia* [5]. Покоящиеся стадии могут служить посевным материалом, который обеспечивает бурный рост при попадании из бентоса в толщу воды в период конвективного перемешивания воды [6].

Полученные нами данные показали, что в июне–июле состав видов-доминантов фитопланктона в прибрежных водах о-ва Русский схож в Амурском и Уссурийском заливах. А в сентябре в каждом из заливов устанавливается собственный состав доминант и, вероятно, через прол. Старка в зависимости от преобладающих ветров происходит трансфер видов.

Исследования проведены на площадке ЦКП «Приморский океанариум», ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

Список литературы

- 1) Юрасов Г.И., Яричин В.Г. Течения Японского моря. Владивосток: ДВО АН СССР, 1991. 176 с.
- 2) Храпченков Ф.Ф., Дулова Н.М., Горин И.И., Сергеев А.Ф. Долговременные измерения течений и температуры воды в заливе Петра Великого в 2004–2007 гг. // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря. 2008. С. 9–56.
- 3) Лоция северо-западного берега Японского моря. От реки Туманная до мыса Белкина. Санкт-Петербург: Изд. ГУНИО, 1996. 360 с.
- 4) Архив погоды г. Владивосток [Электронный ресурс]: сайт. Владивосток, 2022. URL: https://gr5.ru/Архив_погоды_во_Владивостоке.
- 5) Орлова Т.Ю., Морозова Т.В. Покоящиеся стадии микроводорослей в поверхностных осадках залива Петра Великого Японского моря // Биология моря. Т. 35, №4. 2009. С. 256–265.
- 6) Itakura S., Imai I., Itoh K. "Seed bank" of coastal planktonic diatoms in bottom sediments of Hiroshima Bay, Seto Inland Sea, Japan // Marine biology. 1997. V. 128. P. 497–508.

ВЛИЯНИЕ КАТЕХОЛАМИНОВ НА ФАГОЦИТОЗ ГЕМОЦИТОВ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОЙ МИДИИ (*MYTILUS GALLOPROVINCIALIS*)

Ткачук А.А., Кухарева Т.А., Кладченко Е.С., Андреева А.Ю.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: фагоцитоз, гемоциты, катехоламины, средиземноморские мидии

Прибрежные воды Мирового океана подвержены резким колебаниям абиотических факторов среды, такими как температура, соленость, содержание растворенного кислорода и др. [1]. В наибольшей степени с изменениями условий среды сталкиваются организмы литоральной зоны, в частности, двустворчатые моллюски [1, 2]. Изменения параметров среды обитания приводят к развитию физиологической стресс-реакции в организме моллюсков, сопровождающейся выбросом нейромедиаторов в циркуляторное русло гемолимфы, среди которых основными являются катехоламины [3]. Показано, что нейроэндокринная система играет важную роль в регуляции функциональных процессов организма и повышении индивидуальной адаптивности двустворчатых моллюсков к изменениям условий окружающей среды [4]. Клетки гемолимфы (гемоциты) являются центральным звеном клеточного иммунитета моллюсков. При этом гемоциты имеют на поверхности клеточной мембраны катехоламин-связывающие β -адренорецепторы, а также способны сами вырабатывать нейромедиаторы стресса, что предполагает наличие функциональной взаимосвязи между физиологическим стрессом и клеточным иммунитетом у двустворчатых моллюсков [5, 4]. Вместе с тем механизмы воздействия катехоламинов на маркерные показатели иммунитета двустворчатых моллюсков практически не изучены. Цель настоящей работы заключается в исследовании внутриклеточных путей катехоламин-зависимой регуляции реакций клеточного иммунитета у средиземноморской мидии *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819).

Средиземноморские мидии *M. galloprovincialis* (размер: $84,7 \pm 1,5$ мм, вес: $31,2 \pm 2,8$ г, $n=50$) были получены на марикультурной ферме в районе г. Севастополя (ООО «Марикультура»). Для адаптации моллюсков к лабораторным условиям (концентрация кислорода 7-8 мг/л, рН=8,2, температура 18-20 °С), их содержали в пластиковых аквариумах, оборудованных системой аэрации воды в течение 5 дней. Далее из синуса заднего мускула-замыкателя отбиралась проба гемолимфы (0,5-1,5 мл). Клетки гемолимфы трижды отмывали в стерильной морской воде на рефрижераторной центрифуге Eppendorf 5430R (500 g, 5 мин). По окончании отмывки гемоциты ресуспендировали в стерильной морской воде (концентрация клеток $2-4 \cdot 10^6$ кл/мл), делили пробу на 4 части, две из которых инкубировали с 1 и 10 мкМ адреналина в течение 30 минут при температуре +4 °С. Ещё одну пробу инкубировали с 10 мкМ форсколина, являющегося внутриклеточным активатором аденилатциклазы, в течение 1-2 минут. Четвертая часть суспензии служила контролем. Далее пробы смешивали с зеленым флуоресцентным зимозаном (Zymosan Green, Molecular Probes Inc.) в соотношении 40:5 мкл (проба гемоцитов:зимозан) и инкубировали при 20 °С в темноте в течение 60 минут. Затем клетки и отмывали 3 раза в стерильной морской воде на центрифуге при 500 g для удаления свободного зимозана. Клетки наносили на предметное стекло и фотографировали на флуоресцентном микроскопе Olympus CX 43 (Япония). Фагоцитарную активность (ФА) гемоцитов рассчитывали как процент клеток, поглотивших частицы зимозана. Фагоцитарный индекс (ФИ) определяли как среднее число частиц зимозана на один гемоцит. Объем выборки составил 10 повторностей. Для определения статистически значимых результатов использовался непараметрический U-критерий Манна-Уитни.

Стимуляция гемоцитов мидий адреналином (конечная концентрация в суспензиях 1 и 10 мкМ) не влияла на процесс фагоцитоза: достоверных изменений ФИ и ФА не выявлено. Однако в стимулированных пробах 1 мкМ адреналина была наиболее выражена тенденция к уменьшению числа поглощенных частиц гемоцитами и снижалось число клеток, способных к фагоцитозу, в то время

как при 10 мкМ адреналина эти показатели возрастали. Форсколин (10 мкМ) также не влиял на процесс фагоцитоза, наблюдалась только тенденция к увеличению значений ФИ и ФА.

Таким образом, установлено, что процесс фагоцитоза в гемоцитах средиземноморской мидии *M. galloprovincialis* не зависит от присутствия в среде адреналина и не регулируется посредством активации внутриклеточной аденилатциклазы, что, вероятно, может свидетельствовать об отсутствии влияния физиологического стресса в организме двустворчатых моллюсков на нейтрализацию инфекционных агентов путем фагоцитоза.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИНБЮМ «Механизмы функционирования иммунной системы двустворчатых моллюсков и физиологические основы ее адаптации к абиотическим, биотическим и антропогенным факторам окружающей среды» № 1023033 000140-3-1.6.16 (FNNZ-2024-0035).

Список литературы

- 1) Lange X., Klingbeil K., Burchard H. Inversions of estuarine circulation are frequent in a weakly tidal estuary with variable wind forcing and seaward salinity fluctuations //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 2020. – Т. 125. – №. 9. – С. e2019JC015789.
- 2) Pourmozaffar, S., Tamadoni Jahromi, S., Rameshi, H., Sadeghi, A., Bagheri, T., Behzadi, S., Abrari Lazarjani, S. The role of salinity in physiological responses of bivalves //Reviews in Aquaculture. – 2020. – Т. 12. – №. 3. – С. 1548-1566.
- 3) Wei, H., Chen, M., Deng, Z., Zhao, W., Li, Y., Fang, W., ... & Yu, G. Immune and antioxidant responses of pearl oyster *Pinctada maxima* exposed to acute salinity stress //Aquaculture Research. – 2022. – Т. 53. – №. 6. – С. 2439-2447.
- 4) Lacoste, A., Malham, S. K., Cueff, A., & Poulet, S. A. Noradrenaline modulates oyster hemocyte phagocytosis via a β -adrenergic receptor–cAMP signaling pathway //General and comparative endocrinology. – 2001. – Т. 122. – №. 3. – С. 252-259
- 5) Nuria, R., Maresca, F., Cao, A., Villalba, A. Bivalve haemocyte subpopulations: a review //Frontiers in Immunology. – 2022. – Т. 13. – С. 826255.

МИКРОФЛОРА КОРЮШКИ *OSMERUS EPERLANUS* (LINNAEUS, 1758) ЗА ДЛИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ

Трофимова А.В., Авдеева Е.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», г. Калининград

Ключевые слова: микрофлора, корюшка, бактерии, питательные среды, река Дейма

Объектом нашего исследования была корюшка европейская *Osmerus eperlanus* Linnaeus, 1758. Корюшка - важный промысловый объект. Исследования микрофлоры корюшки проводили зимой 2022 года, весной и летом 2023 года. Материалом для исследования послужили 54 экземпляра корюшки из реки Дейма Калининградской области. Дейма - типичная равнинная река, протекает на территории Гвардейского и Полесского районов Калининградской области. Глубина колеблется в пределах 2,0 – 3,0 м. Скорость течения в устьевой части составляет около 0,1 м/сек. Истоком является река Преголя у г. Гвардейска, а устьем является Куршский залив у г. Полесска. Дно реки местами илистое и глинистое. На всем протяжении долина Деймы имеет типичный трапециевидный профиль. Большая часть долины занята поймой. Надпойменные террасы выражены нечетко. Коренные берега расчленены долинами малых рек, короткими сухими оврагами и балками различной глубины. Склоны большей частью безлесны, лишь иногда леса подступают к берегам и даже спускаются в долину. Долина Деймы широкая со слабым врезом русла в низменные берега. Пойма двусторонняя, местами заболоченная, с густой мелиоративной сетью. Леса в бассейне реки встречаются в основном в верховьях и на поймах [1].

Проводили первичный бактериологический посев кожи, жабр и внутренних органов на рыбопептонный агар в чашки Петри. Посевы инкубировали в термостате. У бактерий изучали культуральные признаки (степень развития и характер роста, форму колоний, размер колоний, край колоний, поверхность колоний, рельеф колоний, консистенцию колоний, прозрачность колоний, внутреннюю структуру колоний, пигментообразование, цвет колоний.). Определяли морфологические признаки (окраску по Граму, форму, наличие спор). Физиолого-биохимических признаки устанавливали (постановкой теста на оксидазу, теста на каталазу и постановкой культур на цветной ряд). Цветной ряд включал в себя следующие диагностические среды: полужидкий агар (ПЖА), рыбопептонный желатин (РПЖ), агар Клигlera, среду Хью-Лейфсона, среды Гисса с углеводами, среду для определения редукции нитратов в нитриты, среду Кларка для определения ацетилметилкарбинола и метилрота, среду для определения индола, среду для определения эскулина [2, 3, 4]. Определяли бактерий по культуральным, морфологическим и физиолого-биохимическим признакам до рода и вида с помощью определителя бактерий Берджи [5]. За всё время исследования было выделено 6 родов бактерий.

В микрофлоре корюшки в зимний период были обнаружены бактерии следующих родов: *Aeromonas*, *Bacillus*, *Hafnia*, *Pseudomonas*. У корюшки преобладали грамотрицательные бактерии (7 видов). Грамположительных бактерий найдено только 2 вида. Из грамотрицательных видов бактерий высевали аэромонад: *Aeromonas veroni*, *Aeromonas sobria*, *Aeromonas caviae*, *Aeromonas schubertii*, *Aeromonas media*, *Hafnia alvei* и псевдомонад *Pseudomonas pseudoalcaligenes*. Грамположительные бактерии представлены бациллами *Bacillus coagulans*.

В микробиоценозе корюшки в весенний период выделены бактерии родов: *Aeromonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Streptococcus*. У корюшки высеяли 16 видов грамположительных бактерий и 3 вида грамотрицательных бактерий. Из грамположительных бактерий доминировали бациллы: *Bacillus brevis*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus firmis*, *Bacillus megaterium*, *Bacillus pulvifaciens*, *Bacillus polymyxa*, *Bacillus stearothermophilus*, стрептококки *Streptococcus equi* и *Streptococcus iniae*. Грамотрицатель-

ные бактерии представлены аэромонадами *Aeromonas caviae* и *Aeromonas veronii*, а также энтеробактерами *Enterobacter nimipressuaralis*.

Летом в микрофлоре корюшки высеяли бактерий родов *Aeromonas*, *Bacillus*, *Enterobacter*, *Pseudomonas*. Из кожи и внутренних органов корюшки было выделено 13 видов грамположительных бактерий и 5 видов грамотрицательных бактерий. Из грамположительных видов бактерий доминировали бациллы *Bacillus alvei*, *Bacillus badius*, *Bacillus brevis*, *Bacillus coagulans*, *Bacillus macerans*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus stearothermophilus*. Грамотрицательные бактерии представлены аэромонадами *Aeromonas veronii*, энтеробактерами *Enterobacter agglomerans* и *Enterobacter nimipressuaralis* и псевдомонадами *Pseudomonas mallei*.

Паразитофауна корюшки исследуется сотрудниками АтлантНИРО. Микрофлора корюшки впервые изучается в научно-исследовательской ихтиопатологической лаборатории НИИЛ Калининградского государственного технического университета с 2014 года.

В результате проведенных нами исследований можно сделать следующие выводы. Из грамотрицательных бактерий в микрофлоре корюшки во все сезоны года отмечали наличие аэромонад. Псевдомонад обнаруживали только в зимний и летний периоды. Из грамположительных бактерий в микробиоценозе корюшки встречали бацилл, которые доминировали во все сезоны года. Они являются обычной микрофлорой для рыбы. Энтеробактеров высеивали в весенний и летний периоды, что, вероятно, связано с поступлением их извне с хозяйственно-бытовыми сточными водами в реку Дейма и затем попаданием их из воды в рыбу. Стрептококки обсеменяли рыб только в осенний период. В бактериофлоре корюшки в зимний период были нами выделены бактерии рода *Hafnia*, которые регистрируются в воде открытых водоемов и, вероятно, попали в микрофлору рыб с хозяйственно-бытовыми сточными водами. В бактериофлоре из условно-патогенных бактерий для рыб встречали аэромонад и псевдомонад. Доминировали в микробиоценозе аэромонады, которые могут вызвать бактериальное заболевание - аэромонадоз у изучаемого объекта. Также выявление *Aeromonas caviae* свидетельствует об органическом загрязнении реки во время наших исследований.

-

Список литературы

- 1) Река Дейма. [Электронный ресурс] URL: https://istok39.ru/reka_deyma (дата обращения: 22.02.2024)
- 2) Авдеева Е.В., Казимирченко О.В., Котлярчук М.Ю. Методы диагностики болезней рыб. Часть 1. Диагностика инфекционных болезней рыб: учеб. пособие. Калининград: ФГБОУ ВПО "КГТУ", 2010. 110 с.
- 3) Авдеева Е.В., Кузьмина С.А., Котлярчук М.Ю., Царевский Ю.П. Таксономия микроорганизмов и методы их идентификации. Калининград: КГТУ, 2003. 84 с.
- 4) Головина Н.А., Авдеева Е.В., Евдокимова Е.Б., Казимирченко О.В., Котлярчук М.Ю. Практикум по ихтиопатологии. М: МОРКНИГА, 2016. 417 с.
- 5) Хоулт Дж., Криг Н. Определитель бактерий Берджи. Т.1 М: Мир, 1997. 432 с.

ПЕРВОЕ В РОССИИ РАЗВЕДЕНИЕ *GNATHANODON SPECIOSUS*

Трубицин В.Ю.

Крокус Сити Океанариум, г. Красногорск

Ключевые слова: Gnathanodon speciosus, золотой каранг, разведение, пелагическая личинка рыбы, выращивание, марикультура, океанариум.

Автор статьи является руководителем биологической службы «Крокус Сити Океанариум», частной организации, находящейся в московской области, и принадлежащей бизнесмену А. И. Агаларову. Океанариум содержит 70 водных экспозиций, из них 36 с искусственной морской водой, остальные пресноводные. Главный морской аквариум вмещает 1600 тонн воды, в нём содержатся около двухсот особей рыб 28 видов, в том числе сорок особей золотых карангов.

Золотой каранг (*Gnathanodon speciosus*) – представитель монотипичного рода *Gnathanodon* семейства Ставридовые (Sparangidae). Золотой каранг широко распространен в тропических и субтропических водах Индийского и Тихого океанов, от Южной Африки на западе до Центральной Америки на востоке, от Японии на севере и до Австралии на юге. Вид преимущественно обитает в прибрежных водах - как на рифовых, так и на песчаных субстратах [1]. Молодые особи часто сопровождают крупных рыб – акул, скатов и групперов. От других представителей семейства золотой каранг отличается окрасом – молодые рыбы ярко жёлтые с черными поперечными полосами. С возрастом полосы тускнеют и окрас становится менее ярким, но при возбуждении полосы снова проступают.

Золотой каранг - популярная для содержания в публичных морских аквариумах пелагическая рыба. В странах Юго-Восточной Азии золотой каранг является важным объектом коммерческого рыболовства и марикультуры. Как правило, для нужд океанариумов и в качестве посадочного материала для марикультуры мальки золотых карангов вылавливаются из природы [2]. Разведение золотого каранга в неволе – сложный и не до конца освоенный процесс, так как золотые каранги имеют очень мелкую пелагическую личинку со сложным планктонным питанием. Описаны лишь несколько случаев воспроизводства золотого каранга в неволе с последующим выращиванием личинки до малька – все они проводились в рамках научных исследований. На острове Тайвань с восьмидесятых годов ведется обширная работа по созданию технологий выращивания мальков пелагических тропических рыб для марикультуры – проводятся исследования около 90 видов рыб. В начале двухтысячных в этот список вошел и золотой каранг [3].

В 2015 году в США проводилось исследование разведения золотого каранга на базе Департамента природных ресурсов Южной Каролины и Университета Флориды. Маточное стадо было собрано из особей, содержащихся в местном океанариуме (шесть самцов и две самки), и помещено в бассейны с замкнутой циркуляцией. С помощью интродуцированного гормонами нереста была получена оплодотворенная икра. Личинка выращивалась на искусственно культивируемом планктоне. Исследователям удалось вырастить до мальков размером 3,7 см 4,3% от исходного количества личинок [4].

В Крокус Сити Океанариуме золотые каранги появились в 2018 году. Из Шри-Ланки были получены подростки длиной 15-20 см. К лету 2021 года каранги достигли размеров 35-40 см и приобрели окраску характерную для взрослых особей. Первый нерест золотых карангов в Крокус Сити Океанариуме наблюдали в 2022 г.. В июле 2023 г. в главном морском аквариуме была замечена новая нерестовая активность золотых карангов, и было принято решение попробовать собрать и инкубировать их икру.

Икра собиралась из толщи воды аквариума с помощью сачка из мельничного газа, привязанного к длинной пропиленовой трубе. Икринки из сачка были перемещены в пластиковое двадцатилитровое ведро с водой из аквариума (соленость 33‰, температура 26°C, pH 7,7). В ведро с водой

был добавлен распылитель от компрессора и метиленовая синь, до окрашивания воды в светло-синий цвет. На следующий день икринки были исследованы под микроскопом - в большинстве из них развивались зародыши. Далее вода из ведра вместе с икринками была разделена на две части: одну поместили в стеклянный аквариум объемом 200 литров, а другую в аквариум особой карусельной конструкции для содержания медуз. Особенность аквариума для медуз в том, что он не имеет углов в одной из своих плоскостей - вода в нем циркулирует по кругу. Для осуществления движения воды и насыщения её кислородом в аквариумы были помещены распылители от воздушного компрессора. 14 июля 2023 г. из икры вылупились личинки. Они свободно плавали в толще воды увлекаемые течением от распылителя. Личинки были исследованы под микроскопом - у них отсутствовал рот, присутствовал желточный мешок.

Для обеспечения питания личинок в аквариумы были добавлены планктонные организмы - микроводоросль *Isochrysis galbana*, солоноватоводная коловратка *Brachionus plicatilis* и морские копеподы. Над аквариумами были установлены светодиодные светильники, освещение велось круглосуточно. В прямоугольном аквариуме в течение трёх дней погибли практически все личинки, далее работа велась только с личинками из аквариума для медуз. Через трое суток после вылупления исследование личинок показало появление рта и начало питания фитопланктоном. В аквариуме с личинками мы отметили размножение зоопланктона – появились науплии коловраток и копепод. На двенадцатый день после вылупления личинок мы измерили их размер – 4 мм, и подсчитали количество – 15 особей. На двадцать пятый день после вылупления личинки мы наблюдали начало метаморфоза, в качестве корма стали давать науплий артемии. Мальковой стадии достигли 5 особей. Далее мальки были пересажены в просторный аквариум с активной системой фильтрации. После пересадки трое мальков погибло, предположительно от стресса. Мальки были переведены на рацион из мелконарезанных морепродуктов, мотыля и специализированного сухого корма. По состоянию на январь 2024 года мальки золотых карангов стали подростками размером 8 см и продолжают расти.

Личное финансирование

Список литературы

- 1) FishBase. 2023. <https://www.fishbase.se/summary/gnathanodon-speciosus>
- 2) Chou R., Lee H.B. Commercial marine fish farming in Singapore // Aquaculture Research. V. 28. 1997. P. 767–776.
- 3) Liao I.C., Su H.M., Chang E.Y. Techniques in finfish larviculture in Taiwan // Aquaculture. V. 200. 2001. P. 1–31.
- 4) Broach J.S., Ohs C.L., Palau A., Danson B., Elefante D. Induced spawning and larval culture of golden trevally // North American Journal of Aquaculture. V. 77. 2015. P. 532–538.

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТАРНОЙ ИНВАЗИИ, ВЫЗВАННОЙ *СОССОМУХА PARASITICA*, НА ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ *MODIOLUS KURILENSIS* ЯПОНСКОГО МОРЯ

Тумас А.В., Сокольникова Ю.Н.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: *Modiolus kurilensis*, *Coccomyxa*, гистопатология, двустворчатые моллюски, паразит, стадии заболевания.

В настоящее время среди патогенов двустворчатых моллюсков особую тревогу вызывают недавно обнаруженные у ряда представителей этого класса зеленые микроводоросли рода *Coccomyxa*. Заражение микроводорослями в акваториях для каждого из видов моллюсков носит массовый характер, вызывая у хозяев различные патологии, нарушающие процессы кальцификации раковины, метаболическую активность и репродуктивный цикл, что в свою очередь ведет к значительному отставанию в росте и развитии зараженных особей. Данные о *Coccomyxa* носят спорадический характер, и касаются в основном лишь симптоматики заболевания. При этом подавляющая часть работ основывается на описании клеточной морфологии и констатации крайне негативного влияния фитопатогена на организм хозяина. Поэтому в данной работе была предпринята попытка изучить развитие болезни, вызванной паразитической микроводорослью *Coccomyxa parasitica* у двустворчатых моллюсков *Modiolus kurilensis*.

Для этого на глубине до 5 м из б. Подсобной (б. Средняя) залива Восток Японского моря было выловлено 65 модиолусов. У выловленных моллюсков оценивали морфометрические параметры раковины (длина, ширина и высота). В результате для дальнейшей работы было использовано 48 половозрелых особей *M. kurilensis* 4-5 лет. После вскрытия проводили тщательный макроскопический осмотр тела с предварительным определением степени зараженности модиолусов по внешним признакам (деформации, эрозии, просветы и наличие жемчужин раковины; число и интенсивность инфильтрации зараженных микроводорослью органов, их внешний вид – ослизненность, рыхлость, цвет), а также взвешивание мягкой части тела. Для гистологического анализа в качестве репрезентативных органов брали образцы пищеварительной железы (ПВЖ) и почек, у которых проводили количественный анализ ряда параметров: соотношение типов пищеварительных трубочек и размер гранулоцитом в ПВЖ; в почках – число, плотность, площадь, соотношение числа максимального и минимального размера конкреций, форма нефроцитов, толщина базальной мембраны канальцев; в обоих органах – некроз, инфильтрация интерстициального пространства гемоцитами и соединительной тканью (фиброз), а также наличие паразитов. После чего производили гомогенизацию тел моллюсков для подсчета числа микроводорослей и определения степени их инфицирования.

Было установлено, что среди 48 моллюсков 9 особей (18,8 %) не заражены микроводорослями (несмотря на то, что были взяты из одной и той же друзы, что и зараженные). Для оставшихся 39 животных, в тканях которых были обнаружены паразитические микроводоросли, было выделено четыре степени инвазии. У животных первой степени инфицирования, обнаруженной у 7 особей (14,5 %), в 1 мл гемолимфы присутствовало от 0,19 до $1,25 \cdot 10^7$ клеток водорослей, в самом теле моллюска микроводоросли либо не встречались, либо достигали не более $2,86 \cdot 10^7$ клеток на особь. При этом в зеленый цвет была окрашена только гемолимфа. Вторая степень была обнаружена у 12 модиолусов (25 %), у которых в гемолимфе насчитывалось от $2,05$ до $4,05 \cdot 10^7$ клеток водорослей, а в теле – от $5,41$ до $10,66 \cdot 10^7$ клеток на особь, при этом край мантии и кишка, как и гемолимфа были окрашены в зеленый цвет. Вторая степень была также обнаружена у 12 животных (25 %), в гемолимфе присутствовало от $4,33$ до $7,85 \cdot 10^7$ клеток водорослей, а в теле – от $17,15$ до $28,53 \cdot 10^7$ клеток на особь, при этом в интенсивный зеленый цвет были окрашены гемолимфа, кишка,

гонада и край мантии с более интенсивной окраской и большей площадью. При четвертой степени (16,7 % моллюсков) в гемолимфе число водорослей варьировало от 8,25 до 17,33 *10⁷, в теле – от 39,79 до 98,95 *10⁷, вся проксимальная часть гонады, мускул-аддуктор, жабры, кишка и мантия были окрашены в интенсивный зеленый цвет.

Также показано, что с развитием инвазии у моллюсков достоверно уменьшались масса тела и длина раковины (при почти неизменной на всех стадиях ширине, что приводило к ее округлению).

Гистологический анализ ПВЖ показал, что уже с первой стадии развития инвазии происходит достоверное повышение частоты и интенсивности некротических процессов (до 19,83 ± 2,56 %) и фиброза интерстиция (до 77,25 ± 9,85 %). Гемоцитарная инфильтрация интерстициального пространства достоверно возрастала со второй стадии 87,50 ± 69,94 %, и затем снижалась до 58,63 ± 8,75 %. Гранулоциты появлялись уже на первой стадии инфицирования (1,57 ± 0,75 %), число и площадь которых незначительно снижались лишь к четвертой – 0,87 ± 0,56 %. Также у инфицированных особей изменялось соотношение типов пищеварительных трубочек: увеличилось число трубочек I типа, снижалось число трубочек II и III типов снизилось, а IV – почти не изменились. Кроме того, у зараженных микроводорослями моллюсков в ПВЖ чаще обнаруживались паразиты рода *Nematopsis* sp. в сравнении со здоровыми.

При анализе гистологических препаратов почек было обнаружено, что уже с первой стадии развития инвазии у *M. kurilensis* наблюдалось постепенное и достоверное увеличение площади интерстиция, инфильтрированной фибриллярной тканью (до 76,12 ± 0,79 %). Инфильтрация гемоцитами и некроз имели ту же тенденцию. Нефроциты, зараженных особей приобретали достоверно более округлую форму, а базальная мембрана трубочек становилась более утолщенной по сравнению со здоровыми. С развитием инвазии также достоверно увеличилось число конкреций и их размер, тогда как плотность конкреций – снижалась. Паразиты рода *Nematopsis* sp. в почках встречались редко и лишь у животных терминальных стадий заражения.

Таким образом, у *M. kurilensis* в ПВЖ и почках с развитием инвазии, вызванной *C. parasitica*, наблюдалось повышение частоты встречаемости и интенсивности инфильтрации интерстициального пространства фибриллярной и гемоцитарной тканью, а также некроза и паразитов. В почках, кроме того, происходило изменение параметров конкреций и базальной мембраны. Выявленные патогенетические изменения в органах моллюсков свидетельствуют о крайне негативном влиянии микроводорослей на физиологическое состояние модиолусов, приводящем не только к снижению уровня их здоровья, но и повышению восприимчивости к сопутствующим заболеваниям, вызванных в том числе паразитами, отличными от *Soccostyxa*.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10051, <https://rscf.ru/project/23-76-10051/> и при поддержке Фонда имени Геннадия Комиссарова на базе ЦКП «Приморский океанариум» ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ СИВУЧА *EUMETOPIAS JUBATUS* SCHREBER, 1776

Усатов И.А.¹, Бурканов В.Н.^{2,3}

¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток

²Консалтинговая компания по дикой природе Северной Пацифики, Сизтл

³Лаборатория по изучению морских млекопитающих Аляскинского рыбохозяйственного центра НСМР/НОАА,
Сизтл

Ключевые слова: сивуч, экология, объекты питания, трофическая экология

Исследовали трофическую экологию сивуча *Eumetopias jubatus* (Schreber, 1776) в границах Дальнего Востока России (ДВР) используя данные копрологического анализа. Материал был получен в результате анализа непереваренных остатков пищи в пробах экскрементов, собранных на лежбищах ДВР в период 2004-2008 гг. (916 проб). Экскременты промывались в струе проточной воды через колонку с набором сит (1 мм, 0,71 мм и 0,50 мм). Видовой состав объектов питания сивуча в пробах экскрементов был определён специалистами морфологами компании Pacific Identification Inc. (Виктория, Британская Колумбия, Канада). Рассчитывали частоту встречаемости (FO), как отношение количества проб, содержащих рассматриваемый кормовой объект к общему количеству проб. Модифицированная частота встречаемости (MFO) объектов питания рассчитывалась для оценки вклада каждого кормового объекта в общий рацион. Разнообразие диеты оценивалось модифицированным индексом разнообразия Шеннона (DDI) [1]. Средний размер одной пробы вычислялся по количеству объектов питания, приходящихся на 1 пробу (МКОП). Использовали анализ главных компонент (PCA) для снижения размерности наших данных и выделения отдельных регионов с отличительной структурой рациона питания сивуча. Для описания изменчивости диеты выбраны объекты питания, встречающиеся более чем в 5% проб в любом из анализируемых регионов. Все статистические процедуры были выполнены в среде R.

Обнаружено 65 объектов питания, относящихся к 27 семействам. Наиболее потребляемой пищей являлась рыба (FO = 99,8%). Головоногие моллюски *Cephalopoda* играли второстепенную роль в питании (8,4% FO; 3,3% MFO). В группу главных объектов добычи вошло 14 объектов питания, которые вносили в сумме основной вклад 86,0% MFO: песчанка *Ammodytes hexapterus* Pall., 1814; головоногие моллюски; тихоокеанская сельдь *Clupea pallasii* (Valenciennes, 1847); бычки Cottidae; тихоокеанская треска *Gadus macrocephalus* (Tilesius, 1810); трехиглая колюшка *Gasterosteus aculeatus* (Linnaeus, 1758); однопёрый терпуг *Pleurogrammus monopterygius* (Pall., 1810); камбалы Pleuronectidae; тихоокеанские лососи рода *Oncorhynchus*; минтай *Gadus chalcogrammus* (Pall., 1814); северный волосозуб *Trichodon trichodon* (Tilesius, 1813); мойва *Mallotus villosus* (Müller, 1776); липаровые Liparidae; тихоокеанская зубастая корюшка *Osmerus mordax* (Mitchill, 1814). PCA выявил 3 региона с разным составом питания сивуча - Курильские о-ва (KUR), п-ов Камчатка с Командорскими о-вами (КС) и северная часть Охотского моря (ОКН). Рацион сивуча ОКН состоял главным образом из минтая (FO = 62,3%) и сельди (FO = 54,7%). Терпуг полностью отсутствовал в рационе. Другими главными объектами питания (FO > 5%) сивучу в Охотском море служили тихоокеанские лососи, бычки, треска. Основу рациона сивуча (FO > 5%) KUR составляют: северный однопёрый терпуг, минтай, тихоокеанские лососи, рогатковые, головоногие моллюски. Важной особенностью диеты KUR было отсутствие в составе пищи камбал, колюшки, песчанки, сельди, и малая роль тихоокеанской трески, северного волосозуба (FO < 5%). Сивучи КС питались более разнообразно, включая 3 кормовых объекта, редко потребляемых в других регионах: мойва, тихоокеанская зубастая корюшка, трехиглая колюшка.

В группе репродуктивных лежбищ МКОП было схоже между всеми регионами, составляя два объекта питания, но интерквартильные размахи различались между регионами (IQR: 2-3; IQR:

1-3; IQR: 1-4 для регионов KUR, ОКН, КС соответственно). На нерепродуктивных лежбищах Курильских о-вов МКОП было самым низким среди всех анализируемых групп (Me = 1, IQR: 1-2), и сильно отличалось от МКОП нерепродуктивных лежбищ региона Камчатка и Командорские о-вов (Me = 3, IQR: 2-5). Наибольшее разнообразие рациона было характерно для репродуктивного лежбища КС региона - м. Козлова (DDI = 5,3). Самое низкое значение индекса Шеннона отмечено на нерепродуктивных лежбищах Курильских о-вов (DDI = 3,5).

Исследование кормовых объектов сивуча показало, что его добычей являются виды с ярко выраженной сезонностью присутствия у берега или на шельфе в зависимости от времени года. Формируемые скопления жертв постоянны в пространстве и приурочены к специфическим гидробиологическим условиям, таким как особенности рельефа дна, специфическим температурным режимам, динамики вод. Концентрация добычи, в свою очередь, влияет на выбор мест питания хищников. В каждом регионе сезонные особенности распределения кормовых объектов специфичны. Для их эффективного использования у животных должны быть ассоциации местоположения концентраций кормовых пятен с конкретным участком акватории и временем успешной кормежки. Мы предполагаем, что оптимальная стратегия добывания пищи у сивуча – использование концентрированных пятен добычи, которые представляют собой плотные скопления кормовых объектов. Однако иногда оптимальная стратегия добывания пищи - поиск и кормление на кормовых пятнах, может быть неэффективной. В этом случае кормовая стратегия, отражает поиск рассеянной добычи или разреженных кормовых пятен, что сходно со сбором одиночных кормовых объектов. Такая стратегия характерна для питания сивуча на лежбищах восточного побережья Камчатки при отсутствии массовой и доступной пищи. При этом отмечено высокое разнообразие потребляемой пищи и сильные различия между составом рационов в отдельных кормовых походах. Прерывистое кормление может быть менее выгодно для сивуча из-за высоких энергетических затрат, в отличие от кормления на участках концентрированных кормовых ресурсов. Неблагоприятная кормовая база на восточном побережье Камчатки, выявленная нами, может объяснять частые пропуски родов самок сивуча в этом регионе [2].

Работа выполнена на базе ЦКП «Приморский океанариум», ННЦМБ ДВО РАН (г. Владивосток). Сбор и анализ проб выполнен при поддержке Alaska SeaLife Center и North Pacific Wildlife Consulting, LLC.

Список литературы

- 1) Merrick R.L., Chumbley M.K., Byrd G.V. Diet diversity of Steller sea lion (*Eumetopias jubatus*) and their populations decline in Alaska: a potential relationship. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, № 54. 1997. P. 1342–1348.
- 2) Altukhov A.V., Andrews R.D., Calkins D.G., Gelatt T.S., Gurarie E.D., et al. Age Specific Survival Rates of Steller Sea Lions at Rookeries with Divergent Population Trends in the Russian Far East. *PLOS ONE*, № 10 (5). 2015. e0127292. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127292>

ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВИРИО-, БАКТЕРИОПЛАНКТОНА И ЦИАНОБАКТЕРИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЧЁРНОГО МОРЯ В ПЕРИОД ВЕСЕННЕЙ ГОМОТЕРМИИ

Уфимцева М.А., Сахонь Е.Г., Муханов В.С.

Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: вириопланктон, бактериопланктон, цианобактерии, вертикальное распределение, численность, Черное море, проточная цитометрия.

В пелагиали вертикальное распределение микробных сообществ, включая вирусы, бактерии и пикофитопланктон, является одним из критических факторов, определяющих биогеохимические циклы и важнейшие функциональные показатели морской экосистемы [1]. Несмотря на ключевую роль этих сообществ, взаимосвязь между их количественными показателями и вертикальной структурой в Чёрном море пока остаются недостаточно исследованы или не исследованы вовсе. Чтобы восполнить этот пробел, в рамках данной работы ставилась задача оценить обилие вирио-, бактериопланктона и пикоцианобактерий на разрезах у южного побережья Крымского полуострова, а также провести анализ вертикального распределения этих сообществ в весенний период. Исследование проводили с марта по апрель 2023 г. в 126 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» на разрезах по нормали к южному побережью Крымского полуострова – ялтинском и алуштинском.

Пробы отбирали с помощью розетты батометров на нескольких горизонтах от поверхности до глубины 80 м с учетом данных STD-зондирований о гидролого-гидрохимической структуре водного столба. Пробы морской воды фиксировали формалином (2%), после помещения в 5-мл криопробирки замораживали в нескольких повторностях в жидком азоте и хранили до их обработки в условиях стационарной лаборатории на берегу сразу по завершении рейса.

Обилие вириопланктона, бактериопланктона и пикоцианобактерий рода *Synechococcus* определяли методами проточной цитометрии с помощью проточного цитометра Cytomics FC 500 (Beckman Coulter, США), оборудованного 488 нм однофазным аргоновым лазером, и программного обеспечения СХР. Обработку цитометрических данных проводили с помощью программного обеспечения Flowing Software v. 2.5.0 (Perttu Terho, Turku Centre for Biotechnology, University of Turku, Finland, <http://www.flowingsoftware.com/>).

По результатам прямого счёта общая численность вириопланктона в районах исследования во всём диапазоне глубин от поверхности до 80 м составляла $9,68 \pm 1,09 \times 10^6$ частиц/мл и изменялась от $2,18 \times 10^6$ до $2,00 \times 10^7$ кл/мл. Численность бактериопланктона была на порядок меньше и составляла $0,57 \pm 0,07 \times 10^6$ кл/мл и изменялась в диапазоне от $0,19 \times 10^6$ до $1,09 \times 10^6$ кл/мл. Численность пикоцианобактерий рода *Synechococcus* составляла $8,17 \pm 1,27 \times 10^3$ кл/мл и изменялась в диапазоне от $0,15 \times 10^3$ до $19,96 \times 10^3$ кл/мл. Для диапазона глубин от подповерхностного слоя до 80 м величины отношения числа вирусов к бактериям (VBR) составляли от 10 до 34.

Минимумы бактериопланктона соответствовали максимумам вириопланктона, и наоборот. Эти наблюдения могли свидетельствовать о смертности бактерий вследствие вирусной инфекции.

Максимумы численности цианобактерий у поверхности совпадали с максимумами фотосинтетически активной радиации на поверхности. В свою очередь, максимумы численности бактериопланктона совпадали с максимумами хлорофилла. Максимум вирусов также наблюдали в подповерхностном слое в пике хлорофилла, как это было показано в других работах [2,3].

Профили вертикального распределения вирио-, бактериопланктона и цианобактерий на алуштинском и ялтинском разрезах показали, что с увеличением глубины отбора проб уменьшалось количество вирусов и бактерий. Наоборот, соотношение вирусов и бактерий увеличивалось с глубиной. Количество цианобактерий сначала увеличивалось с глубиной, достигая максимума на 16

м, а затем резко снижалось. Таким образом, в целом, наблюдали схожие закономерности в вертикальном распределении микроорганизмов на разных станциях.

Получены первые для Чёрного моря оценки обилия вириопланктона (VIR) и отношения вирусы/бактерии (VBR) в период весенней гомотермии. Диапазоны изменения численности вирио-, бактериопланктона, цианобактерий и величин VBR Чёрного моря, а также их уменьшение с глубиной соответствовали наблюдениям в других акваториях Мирового океана.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 1023032700553-3.

Список литературы

- 1) Azam, F., Malfatti, F. Microbial structuring of marine ecosystems // Nat. Rev. Microbiol. 2007. №5(10). P. 782–791.
- 2) Parsons R.J., Breitbart M., Lomas M.W., Carlson C.A. Ocean time-series reveals recurring seasonal patterns of viroplankton dynamics in the northwestern Sargasso Sea. 2012. ISME J. №6. P. 273–284.
- 3) Hara S., Koike I., Terauchi K., Kamiya H., Tanoue E. Abundance of viruses in deep oceanic waters. 1996. Mar. Ecol. Prog. Ser. №145. P. 269–277.

ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ ЭКТОПАРАЗИТОВ СКАТОВ ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ У ПОБЕРЕЖЬЯ ВЬЕТНАМА

Халаимова А.В.¹, Дмитриева Е.В.¹, Во Тхи Ха²

¹ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Нахимова пр., 2, г. Севастополь, Россия

²Приморское отделение Совместного Российско-Вьетнамского Тропического научно-исследовательского и технологического центра, г. Нячанг, Вьетнам

Ключевые слова: паразиты, моногенеи, ракообразные, хрящевые рыбы, Южно-Китайское море, Вьетнам.

В прибрежных водах Вьетнама постоянно обитает 11 видов скатов-хвосток семейства Dasyatidae и 2 вида ромбовых скатов семейства Rajidae, согласно данным FishBase. Однако информация об эктопаразитах, встречающихся у этих скатов, отсутствует. Известно, что эта группа паразитов может наносить значительный вред рыбам как в естественной среде, так и в условиях их искусственного разведения, а хрящевые рыбы являются объектами массового промысла в данном регионе. Исходя из этого, цель данного исследования – установить видовое разнообразие эктопаразитов скатов данного региона.

В 2019-2023 гг. в Южно-Китайском море у побережья Вьетнама на наличие эктопаразитов исследованы 265 экз. скатов 7 видов сем. Dasyatidae (*Hemistrygon bennettii*, *Hemistrygon* sp. 1, *Telatrygon zugei*, *Maculobatis gerrardi*, *M. macrura*, *Neotrygon* sp.) и Rajidae (*Okamejei hollandi*). Рыба закупалась на рыбных рынках, идентифицировалась как на основе морфологии, так и частичных последовательностей COI мтДНК. Обследование на наличие эктопаразитов проводилось под стереомикроскопом при увеличении ×30. Найденные паразиты собирались и фиксировались в соответствии с методиками, принятыми для соответствующих таксонов (ракообразных и плоских червей), с целью последующего микроскопического и молекулярно-генетического исследования. Определение, промеры и фотографии выполнены на микроскопе Olympus CX41 с использованием программы Olympus CellSens.

Эктопаразиты найдены у 5 видов рыб и представлены 5 видами класса Monogenea (Platyhelminthes), 4 видами Copepoda и личинками изопод сем. Gnathiidae (Crustacea). Моногенеи относились к 2 семействам: Hexabothriidae Price, 1942 и Monocotylidae Taschenberg, 1879. Обнаруженные у обоих видов скатов *Hemistrygon*, а также у *T. zugei* и *M. macrura* монокотилиды идентифицированы как *Monocotyle tritestis* Young, 1967 и *Heterocotyle chinensis* Timofeeva, 1983. Оба вида ранее регистрировались у других видов скатов в Тонкинском заливе у побережья Китая, но у побережья Вьетнама найдены впервые. Гексаботрииды, собранные с жабр ската *M. macrura*, по морфологии и частичным последовательностям гена 18S рДНК, вероятно, относятся к новому роду. Представители этого семейства, найденные у *H. bennettii*, соответствуют диагнозу рода *Hypanocotyle*, но, очевидно, являются новым видом. Для точной таксономической идентификации этих гексаботриид необходимо получение данных по последовательностям генов 28S рДНК и COI мДНК. В клоаке ската *O. hollandi* впервые найдены моногенеи рода *Calicotyle*, которые по совокупности морфологических признаков соответствует *C. kroyeri* Diesing, 1850. Однако с учетом того, что данный вид признан комплексом криптических видов необходимы дальнейшие его исследования.

Паразитические ракообразные были представлены *Lernanthropus* sp. и неидентифицированным видом сем. Caligidae, найденными у *H. bennettii*, а также двумя неопределенными морфотипами копепод и личинками сем. Gnathiidae, обнаруженными у *H. bennettii*, *Hemistrygon* sp. 1, *T. zugei*, *M. gerrardi* и *M. macrura*.

У ската *O. hollandi* найден только 1 вид эктопаразита – моногенея *C. cf. kroyeri*. Тогда как наиболее разнообразная их фауна отмечена у *H. bennettii*: 3 вида моногеней и 4 вида ракооб-

разных. Все идентифицированные эктопаразиты отмечаются у этих видов скатов и у побережья Вьетнама впервые.

Полученные данные демонстрируют, что фауна эктопаразитов скатов данного региона изучена недостаточно. Требуются дальнейшие молекулярно-генетические исследования этих паразитов из-за их важности для рыболовства и аквакультуры. Кроме того, поскольку паразиты рыб могут служить инструментом мониторинга изменений климата и окружающей среды, данные об их разнообразии крайне важны.

Исследование поддержано темой госзадания ИнБЮМ РАН № 121030100028-0 и темой Совместного Российско-Вьетнамского Трощцентра «Эколан Э-3.1».

ВИДОВОЙ СОСТАВ СЕМЕЙСТВА CARPOCANIIDAE В ОТЛОЖЕНИЯХ ЮЖНЫХ ГАЙОТОВ ИМПЕРАТОРСКОГО ХРЕБТА

Хмель Д.С., Василенко Л.Н.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: радиолярии, карпоканиды, Императорский хребет, поверхностные осадки.

Представители семейства Carposaniidae являются одной из разнообразных групп радиолярий, широко распространённой в планктоне кайнозоя и в современном Мировом океане. Из-за небольших размеров скелетов (70-120 мкм) и, как правило, отсутствия доминирования их видов, представители этой группы, встреченные в кайнозойских отложениях, часто остаются в литературе с открытым знаком номенклатуры. Это происходит из-за сложности идентификации не только видов, но и родов карпоканид. Одним из критериев определения родов является расположение цефалического отдела, который не всегда хорошо просматривается при микроскопических исследованиях. Цель работы – выявить морфологические особенности видов семейства Carposaniidae в осадках гайотов Императорского хребта с возможным обнаружением новых видов.

Материал представляет собой поверхностные осадки (0-3 см) и короткие колонки осадков (0-27 см), отобранные с помощью телеуправляемого подводного аппарата "Comanche 18" на гайотах Нинтоку, Джингу, Оджин, Коко и Юряку в 86 и 94 рейсах НИС «Академик М.А. Лаврентьев» (2019 г., 2021 г.) под руководством Т.Н. Даутовой.

Исследуемые осадки содержат богатую фауну радиолярий [1, 2], среди которых виды карпоканид занимают 2-6%. Всего нами определено 7 видов и 5 таксонов, которые отнесены нами к роду *Carposanium* и разделены на 5 форм.

В видовом составе карпоканид распространён *Carposanarium papillosum* Ehrenberg. Он содержится в осадках гайотов Нинтоку, Оджин, Джингу и Коко. Особенностью этого вида является грушевидная форма его скелета с крупными порами и хорошо выраженным цефалисом. *C. acephalum* Naeskel обнаружен в осадках гайотов Коко и Юряку. Особенностью этого вида является удлинённо-овальный скелет с мелкими порами, внутренним (погруженным в тораке) цефалисом и множеством слегка изогнутых, почти параллельных выростов на широком перистоме. *C. acutidentatum* Takahashi также обнаружен в осадках гайотов Коко и Юряку. Этот вид похож на *C. acephalum* формой скелета, пористостью и внутренним цефалисом, характерным для рода *Carposanistrum*. Главным отличием его является зауженное устье с множеством (12-16) острых выростов, прямыми или изогнутыми внутрь вблизи конца.

Другие виды относятся к роду *Carposanium*: *C. nigrinia* Kruglikova обнаружен в осадках гайота Коко. Он характеризуется удлинённо-овальной, почти цилиндрической формой скелета, с мелкими порами и полностью погруженным в тораке цефалисом (вероятно, этот вид можно отнести к роду *Carposanistrum*). *C. obliqua* Naeskel обнаружен в осадках гайотов Джингу и Коко. Особенностью его является близкосферическая форма скелета с расширенным устьем без выростов. *C. pachydermicum* Chen & Tan и *C. flosculum* Naeskel были обнаружены в осадках всех гайотов. Первый из них крупный (90-100 мкм), почти сферический, оканчивающийся слегка суженным перистомом с небольшими параллельными выростами. Второй характеризуется овальной формой скелета, расширенной к низу с небольшими, немного сходящимися выростами на перистоме. *C. prunoides* Naeskel обнаружен в осадках гайотов Нинтоку, Джингу, Коко и Юряку. Он характеризуется небольшими размерами (70-80 мкм), овальной, слегка неправильной формой с небольшим количеством пор и зауженным устьем без выростов.

Кроме приведенных выше видов, нами были обнаружены 5 таксонов по морфологическим особенностям относящихся к семейству Carposaniidae, которые не подходят под диагнозы известных

видов карпоканид [3]. Расположение цефалиса, погруженного наполовину в торакс позволило отнести их к роду *Carpocanium*: *Carpocanium* sp. F.1 обнаружен в осадках гайотов Нинтоку, Джингу и Коко. Он характеризуется близкосферической формой скелета, немного сплюснутой с полюсов и имеет сходство с видом *C. pachydermicum* Chen & Tan, но отличается меньшим количеством пор и меньшими размерами. *Carpocanium* sp. F.2 обнаружен в осадках гайотов Джингу и Коко. Его особенностью является удлинённо-овальная форма скелета с порами среднего размера и цефалисом, расплющено лежащем на тораксе. *Carpocanium* sp. F.3 обнаружен в осадках гайотов Джингу, Оджин, Коко и Юряку. Он имеет сферическую форму скелета с очень узким кольцевым перистомом. *Carpocanium* sp. F.4 обнаружен в осадках гайотов Джингу и Оджин. Отличительная особенность его заключается в каплевидной форме скелета с крупными порами неправильной формы, хаотично расположенными на тораксе. Узкий ребристый перистом заканчивается толстыми выростами. *Carpocanium* sp. F.5 обнаружен в осадках гайотов Нинтоку и Джингу. Он характеризуется овальной формой скелета с чётко выраженным цефалисом и очень узким кольцевым перистомом без выростов.

Таким образом, изучив видовой состав семейства Carposaniidae, мы обнаружили 7 видов из родов *Carpocanium*, *Carpocanistrum* и *Carpocanium*, а также 5 таксонов из рода *Carpocanium*, которые мы считаем новыми. Они будут описаны в ближайшее время по правилам Международного кодекса зоологической номенклатуры.

Авторы благодарят руководителя 86 и 94 рейсов НИС «Академик М.А. Лаврентьев» Т.Н. Даутову за предоставленный осадочный материал.

Работа выполнена по программе фундаментальных научных исследований ТОИ ДВО РАН (тема № 121021700342-9).

Список литературы

- 1) Василенко Л.Н., Даутова Т.Н. Особенности распределения радиолярий в поверхностных осадках южных гайотов Императорского хребта // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (г. Москва, 15–19 ноября 2021 г.). М.: ИО РАН, 2021. Том 1. С. 29-33.
- 2) Хмель Д.С., Василенко Л.Н., Даутова Т.Н. Таксономическое разнообразие радиолярий в отложениях гайота Коко Императорского хребта (по данным колонки LV94-12-K2) // Океанологические исследования: материалы X конференции молодых ученых (г. Владивосток, 24 – 28 апреля 2023 г.). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2023. С. 189-190.
- 3) O'Dogherty L., Suzuki N., Caulet J.-P. & Dumitrica P. Inventory of Cenozoic radiolarian species (Class Polycystinea) – 1834-2020, in O'Dogherty L. (ed.), Catalog of Cenozoic radiolarians. Geodiversitas. 2022. Vol. 44 № 5. P. 75-205. <https://doi.org/10.5252/geodiversitas2022v44a5>. <http://geodiversitas.com/44/5>.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА МОЛЛЮСКОВ РОДА *BUCCINUM* НА ПРИМЕРЕ *B. ECTOMOCYMA* DALL, 1907 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДИКИ ПОДСЧЕТА ОТМЕТОК РОСТА НА СТАТОЛИТАХ

Хорошутина О.А., Артеменков Д.В., Сологуб Д.О.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: брюхоногий моллюск, определение возраста, статолит, регистрирующая структура, оперкулум.

Для управления промыслом брюхоногих моллюсков важно понимать состояние популяции, ее размерно-возрастной состав, долю размножающихся животных, численность пополнения. Ключевым параметром для определения этих характеристик является индивидуальный возраст животных, поэтому крайне важной является возможность его определения. Проблема определения возраста все ещё стоит для отдельных групп брюхоногих моллюсков, а универсального способа не разработано. Для моллюсков рода *Buccinum* показано, что количество отметок на оперкулуме (крышечке) соответствует количеству прожитых лет [1]. Однако, оперкулумы подвержены воздействию окружающей среды, отметки, соответствующие зимним остановкам роста на них, стираются, и большая часть крышечек, по некоторым данным, может просто не читаться [6]. Все это в полной мере относится к такому промысловому брюхоногому моллюску, как *B. ectomocuma*. Для более точного определения возраста и составления размерно-возрастных ключей можно использовать методику определения возраста по внутренним регистрирующим структурам – статолитам, которые не подвержены агрессивному воздействию внешней среды. Для ряда видов показано, что концентрические отметки соответствуют зимней остановке роста моллюска, а значит, могут использоваться для определения возраста [2-4]. Методика определения индивидуального возраста путем подсчета концентрических отметок на шлифах статолитов верифицирована и для вида рода *Buccinum* - *B. undatum* [5]. Цель работы – описать микроструктуру статолитов и апробировать методику для определения возраста *B. ectomocuma*.

Материал собран в октябре 2022 года в ходе проведения научно-исследовательских работ (ловушечной съемки) по оценке распределения и состава промысловых скоплений шельфовых видов крабов в Западно-Камчатской подзоне Охотского моря. Брюхоногие моллюски *B. ectomocuma* в ловушках отмечались в качестве прилова. 21 экземпляр *B. ectomocuma* был отобран в районе с координатами 59°45,2' с.ш.; 158°19,9' - 159°11,2' в.д., для каждого моллюска был произведен биологический анализ, который включал в себя промеры раковины: (высоту, ширину, ширину предпоследнего оборота), вес моллюска (с раковиной и без), промеры оперкулума (длина, ширина, положение ядра), определение пола. Тело моллюска рассекалось в саггитальной плоскости, статолиты извлекались и после очистки закреплялись на предметном стекле. Шлифовка проводилась до центральной плоскости с одной стороны. На шлифе подсчитывали количество отметок, по которым определялся возраст моллюска, проводилось измерение диаметра статолита. Возраст моллюсков также определялся традиционным методом: по количеству отметок на оперкулуме. Сравнение методик проводилось с использованием коэффициента вариации.

Результаты биологического анализа собранных моллюсков показали, что высота раковины (H) изменяется в пределах от 92 до 117 мм ($H_{\text{ср}} = 104,8$ мм), ширина (L) – от 54 до 72 мм ($L_{\text{ср}} = 62,1$), а диаметры статолитов (D) – от 266 до 361 мкм ($D_{\text{ср}} = 302,7$ мкм).

В ходе работы исследована микроструктура статолитов *B. ectomocuma*: на шлифе хорошо заметно тёмное ядро, расположенное в центре. Ядро ограничено первой отметкой, которая, согласно

литературным данным [3], образуется в процессе выклева моллюска. Ядро окружено темными концентрическими отметками, разделенными более широкими светлыми зонами. Предположительно, концентрические отметки статолитов *B. ectomocyna* являются зонами зимней остановки роста: это показано для родственного вида *B. undatum* [5]. Также на шлифах статолитов мы наблюдаем радиальную исчерченность.

Возраст моллюсков, оцененный путем подсчета отметок на статолитах, составил от 12 до 18 лет (в среднем – 14,2 года). Возраст, оцененный путем подсчета отметок по крышечкам, составил от 11 до 20 лет (в среднем – 15 лет). В результате определения возраста моллюска с применением двух разных методик получены схожие результаты с низким коэффициентом вариации (CV в диапазоне от 0% до 8,7%, в среднем 4,7%), при этом читаемость некоторых оперкулумов была затруднена.

Таким образом, в работе описана микроструктура статолитов *B. ectomocyna* и апробирована методика определения индивидуального возраста моллюсков путем подсчета концентрических отметок на статолитах. Этот метод обладает большей точностью, но и большей трудоемкостью по сравнению с классическим методом определения возраста моллюсков по отметкам на оперкулумах и может быть использован для составления размерно-возрастных ключей.

Работа выполнена в рамках государственного задания на выполнение государственных работ Проведение научного исследования (№ реестровой записи 720000Ф.99.1.БН62АБ62000).

Список литературы

- 1) Голиков А.Н. Моллюски Buccinidae Мирового океана // Фауна СССР. Новая серия. Л.: Наука. 1980. № 5 (2). 508 с.
- 2) Chatzinikolaou E., Richardson C. Evaluating growth and age of netted whelk *Nassarius reticulatus* (Gastropoda: Nassariidae) using statolith growth rings // Marine Ecology Progress Series. 2007. № 342. P. 163–176. <https://doi.org/10.3354/meps342163>
- 3) Fisher R.A., Rudders D.B. Population and reproductive biology of the channeled whelk, *Busycotypus canaliculatus*, in the US Mid-Atlantic // Journal of Shellfish Research. 2017. № 36. P. 427–444. <https://doi.org/10.2983/035.036.0215>
- 4) Galante-Oliveira S., Marçal R., Ribas F., Machado J., Barroso C. Studies on the morphology and growth of statoliths in Caenogastropoda // Journal of Molluscan Studies. 2013. № 79. P. 340–345. DOI: 10.1093/mollus/eyt028
- 5) Hollyman P., Leng M., Chenery S., Laptikhovsky V., Richardson C. Statoliths of the whelk *Buccinum undatum*: a novel age determination tool // Marine Ecology Progress Series. 2018. № 598. P. 261–272. <https://doi.org/10.3354/meps12119>
- 6) Kideys A.E. Determination of age and growth of *Buccinum undatum* L. (Gastropoda, Prosobranchia) off Douglas, Isle of Man // Helgoländer Meeresuntersuchungen. 1996. № 50 (3). P. 353–368. <https://doi.org/10.1007/BF02367109>

АГГЛЮТИНИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ГЕМОЛИМФЫ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ИЗ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО ЯПОНСКОГО МОРЯ

Цой Е.А.², Сокольникова Ю.Н.^{1,2}, Гринченко А.В.^{1,2}

¹Национальный научный центр морской биологии имени А.В. Жирмунского, г. Владивосток

²Дальневосточный Федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: двустворчатые моллюски, лектины, агглютинирующая активность, углеводная специфичность.

Многие морские гидробионты являются источником уникальных веществ, которые часто по своей активности превосходят соединения из наземных организмов, обладая различными свойствами, включая иммуномодулирующие, противоопухолевые и антиинфекционные [1]. К таким молекулам можно отнести углевод-связывающие белки, среди которых наиболее изученной и обширной группой являются лектины. Морские организмы обладают большим и сложным по структуре набором лектинов [2]. Двустворчатые моллюски выделяются особым разнообразием углевод-распознающих белков, растворимые формы которых выполняют роль патоген-распознающих рецепторов и агглютининов, обладая при этом высокой антимикробной и противоопухолевой активностью [3].

Были исследованы образцы бесклеточной гемолимфы 17 различных видов *Bivalvia*, 13 из которых, по имеющимся данным, не были ранее изучены на агглютинирующую активность и углеводную специфичность. Для проверки активности углевод-связывающих белков-агглютининов проводили реакцию прямой гемагглютинации (РГА) с суспензиями 12 типов эритроцитов (два типа человеческих, крысиные, мышьиные, кошачьи, собачьи, эритроциты белухи, афалины, белобокого дельфина, моржа, морского котика и нерпы). Результаты РГА визуально фиксировали и показатель выражали в виде логарифма титра $-\log_2(\text{титр})$. Для определения углеводной специфичности проводили ингибирование реакции гемагглютинации (ИРГА), для которой были выбраны образцы и подходящий тип эритроцитов исходя из данных РГА. В ИРГА использовали 24 углеводов различной структуры. Специфичность определяли полуколичественно по степени отмены реакции – насколько сильно в присутствии потенциального лиганда происходит скатывание эритроцитов на дно лунки.

Наиболее широкий спектр углеводной специфичности проявили образцы из моллюсков *Azumpecten farreri* и *Leukoma jedoensis*. Среди доступной литературы не было найдено схожих исследований для данных видов, что делает их особенно перспективными для дальнейшего изучения. Среди всех использованных углеводов наиболее выраженными ингибирующими свойствами обладали N-ацетил-D-глюкозамин, D-глюкуроновая кислота, D-галактуриновая кислота и D-лактоза. 16 из изученных образцов проявили специфичность к N-ацетил-D-глюкозамину и N-ацетил-D-галактозамину, для которой показана биотехнологическая ценность. Например, раннее у растения *Lonchocarpus araripensi* был выявлен лектин со специфичностью к указанным углеводам, который подавляет проницаемость сосудов, ингибирует миграцию нейтрофилов, а также ингибирует свёртывание и адгезию лейкоцитов, что является защитой от осложнений инфекций [4]. Также перспективными для дальнейшего изучения являются 15 образцов, проявивших специфичность к D-глюкуроновой и D-галактуриновой кислотам. Так для лектина асцидии *Didemnum ternatanum* с соответствующей специфичностью были показаны свойства адгезивного фактора и фактора роста [5]. Проведенная работа является первым шагом в поиске и выделении новых молекул, как инструментов гликобиологии и соответствующих разделов биомедицины.

Все проведенные экспериментальные процедуры по взятию крови и манипуляциям с клетками крови животных были проведены в соответствии с биоэтическими нормами (выписка № 2-150224 из заседания № 2 от 15 февраля 2024 г. комиссии по биомедицинской этике ННЦМБ ДВО РАН).

Исследования проведены на площадке ЦКП «Приморский океанариум», НИЦМБ ДВО РАН (Владивосток) при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-76-10051 и государственного задания Министерство науки и высшего образования Российской Федерации № FZNS-2023-0017.

Список литературы

- 1) Беседнова Н.Н. Морские гидробионты - потенциальные источники лекарств // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2014. № 3. С. 4–9.
- 2) Ahmmed M.K., Bhowmik S., Stephen G. Giteru An Update of Lectins from Marine Organisms: Characterization, Extraction Methodology, and Potential Biofunctional Applications // Marine drugs. 2022. № 3. 430 p.
- 3) Gerdol M., Gomez-Chiarri M., Castillo M.G., Figueras A., Fiorito G., Moreira R., Novoa B., Pallavicini A., Ponte G., and Roumbedakis K. Immunity in molluscs: recognition and effector mechanisms, with a focus on bivalvia // Advances in comparative immunology. 2018. P. 225–341.
- 4) Alana F.P., Natália V.F.C., Rodrigues A.-M.S. Assreuy A novel N-acetyl-glucosamine lectin of Lonchocarpus araripensis attenuates acute cellular inflammation in mice // Inflammation Research. 2016 .№ 65. P. 43–52.
- 5) Odintsova N.A., Belogortsevab A.V. Ermaka Adhesive and growth properties of lectin from the ascidian Didemnum ternatanum on cultivated marine invertebrate cells // BBA. 1999. №1448. P. 381–389.

НОВЫЙ ДЛЯ МОРЕЙ РОССИИ ВИД ДИАТОМОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ

Шульгина М.А., Качур Д.И.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: диатомовые водоросли, *Thalassiosira tealata*, сканирующая электронная микроскопия, морфология, филогения

Род *Thalassiosira* является одним из самых больших и трудных в идентификации среди диатомовых водорослей, в том числе из-за наличия большого количества мелкоразмерных представителей. Одним из таких видов является *Thalassiosira tealata*, размер клеток которого составляет 5–12 мкм, который был идентифицирован в результате исследования фитопланктона прибрежных вод зал. Петра Великого, Японского моря с помощью сканирующего электронного микроскопа. Согласно данным литературы, *T. tealata* является обитателем теплых прибрежных вод Тихого океана [1]. Получены штамм *T. tealata* ThZh031120-2 и нуклеотидная последовательность гена 18S рДНК, используемая для молекулярно-генетического анализа. Приведено детальное описание вида, дополненное микрофотографиями и данными по его распределению.

Сбор проб фитопланктона на станциях в бухтах Житкова и Парис (северо-западная часть о-ва Русский), проводили в рамках мониторинговых исследований в 2020 г. Пробы воды собирали с горизонта 0,5 м при помощи 5-литрового батометра Нискина два раза в месяц круглогодично. Наряду с рутинными исследованиями, неидентифицированные клетки рода *Thalassiosira* изолировали из свежей пробы воды под световым инвертированным микроскопом (СМ). Изучение морфологии панцирей *Thalassiosira* проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

Для получения тотальной ДНК из образцов *Thalassiosira* использовали набор ДНК-экстран-2 (ООО “Синтол”). С помощью праймеров SSU_F (5'-KACCTGGTTGATCCTGCCAGT-3') и SSU_R (5'-TCACCTACGGAAACCTTGT-3') был амплифицирован фрагмент, фланкирующий консервативные домены 18S рДНК (далее 18S) [3].

Реакционная смесь для ПЦР объемом 19 мкл включала 10 мкл AmpliTaq Gold 360 Master Mix, 0.5 мкл Enhancer (Thermo Fisher Scientific), 1 мкл раствора тотальной ДНК, по 0,12 мкл (0,048 мМ) прямого и обратного праймеров и деионизированную воду до конечного объема. Термический алгоритм ПЦР, визуализация и очистка ампликонов, а также методика секвенирования и первичной обработки данных описаны ранее [3]. Для филогенетического анализа в качестве референсной базы были привлечены последовательности *Thalassiosira*, *Conticribra* и *Skeletonema* из ГенБанк.

Изучение полевого материала и клеток штамма ThZh031120-2 с помощью СЭМ позволило идентифицировать и составить детальное таксономическое описание нового для флоры морей России вида *T. tealata*. Анализ оригинальных данных показал, что морфологические признаки исследованных нами клеток *Thalassiosira* соответствуют первоописанию вида *T. tealata* и согласуются с данными других исследователей. Морфологически *T. tealata* сходен с *T. curviseriata* по наличию крыловидных отростков у краевых выростов с опорами. Однако, они имеют ряд морфологических отличий. У *T. curviseriata* крыловидные отростки вытянуты вверх, отходят из середины выроста с опорами и часто расходятся на 2–3 ветви. У *T. tealata* крыловидные отростки отходят от концов краевых выростов с опорами, их тонкие кончики упираются в поверхность створки. Для *T. curviseriata* характерно наличие 1–2 центральных выростов с опорами, смещенных от центра створки, тогда как у *T. tealata* отмечено наличие одного центрального выроста с опорами. Также различается количество ареол в 10 мкм: у *T. tealata* их 30–40, у *T. curviseriata* – до 30 в 10 мкм.

Проведенный молекулярно-генетический анализ по маркеру 18S показал отличия полученной последовательности от остальных последовательностей рода *Thalassiosira*, привлеченных из ГенБанка. При построении филогенетического дерева на основе топологии B1 рассматриваемые по-

следовательности сформировали две филогруппы: первая филогруппа включает в себя вид *T. pseudonana* Hasle et Heimdal, 1970 (который занимает базальное положение), а также представителей рода *Conticribra*, формирующих две монофилетические клады с высокими поддержками; вторая филогруппа объединяет остальные виды рода *Thalassiosira*. Данное разделение имеет высокие поддержки по методам построения BI, MP, ML; по методу NJ разделение не поддержано.

Во второй филогруппе в базальном положении находится группа из последовательностей AJ810857.1 *T. concaviuscula* Makarova, 1978 и DQ093365.1 *T. nordenskioldii* Cleve, 1873 (поддержка по методу MP менее 50%), при этом другая последовательность DQ514886.1 *T. nordenskioldii* располагается в монофилетической кладе вида *T. minima* Gaarder, 1951 (поддержка по методу NJ менее 50%). Таким образом, последовательности *T. nordenskioldii* не формируют общую кладу, из-за чего у данного вида на нашем филогенетическом дереве прослеживается парафилия. Виды *T. tumida* (Janisch) Hasle, 1971 и *T. minuscula* Krasske, 1941 формируют отдельные монофилетические клады, в основном, с высокими поддержками (поддержка *T. tumida* по методу NJ менее 50%). Полученная в настоящем исследовании последовательность *T. tealata* находится в хорошо поддержанной группе с видами *T. profunda* (Hendey) Hasle, 1973 и *T. curviseriata* Takano, 1983. Ветви видов в данной группе формируются из одного узла, что является политомией.

Работа частично выполнена в Центре коллективного пользования “Приморский океанариум”, ННЦМБ ДВО РАН (г. Владивосток).

Список литературы

- 1) Takano H. New and rare diatoms from Japanese marine waters. V. *Thalassiosira tealata* sp. nov. // Bull. Tokai Reg. Res. Lab. 1980. № 103. P. 55–63.
- 2) Li Y., Guo Y.Q., Guo X.H. Morphology and molecular phylogeny of *Thalassiosira sinica* sp. nov. (Bacillariophyta) with delicate areolae and fultoportulae pattern // Eur. J. Phycol. 2018. V. 53. P. 122–134.
- 3) Shevchenko O.G., Ponomareva A.A., Turanov S.V., Dutova D.I. Morphological and genetic variability of *Skeletonema dohrnii* and *Skeletonema japonicum* (Bacillariophyta) from the northwestern Sea of Japan // Phycol. 2019. V. 58. P. 95–107.

РОССИЙСКИЕ ОСЕТРЫ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Щербакова В.Д., Барминцева А.Е., Мюге Н.С., Сафронов А.С.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: осетровые рыбы, аквакультура, искусственное воспроизводство, молекулярно-генетическая идентификация вида.

Осетровые рыбы (сем. *Acipenseridae*) являются уникальными представителями ихтиофауны Голарктической зоогеографической области Земли. Для большинства видов этого семейства характерен проходной образ жизни: основная часть жизненного цикла рыб проходит в морях, где представители совершают нагульные миграции. После созревания половых продуктов происходит анадромная нерестовая миграция осетровых рыб в реки [1].

Осетровых, обитающих в реках и морях России, принято разделять на две эволюционные ветви: осетры бассейна Атлантического океана (русский (*Acipenser gueldenstaedtii*), атлантический (*A. sturio*), сибирский осетр (*A. baerii*), белуга (*Huso huso*), севрюга (*A. stellatus*), стерлядь (*A. ruthenus*), шип (*A. nudiventris*)) и бассейна Тихого океана (калуга (*Huso dauricus*), сахалинский (*A. mikadoi*) и амурский осетр (*A. schrenkii*)) [2]. Истинно анадромные миграции среди этих рыб характерны лишь для сахалинского и атлантического осетра: в их жизненных циклах наблюдаются морские и океанические миграции на дальние расстояния. Остальные представители совершают потамодромные речные миграции, мигрируют в солоноватоводное Каспийское море и предустьевые части рек Черного моря или распреснённые участки Амурского лимана [3].

В России все представители семейства всегда относились к наиболее хозяйственно ценным видам рыб, до XX века был широко распространен промысел на всех акваториях, входящих в ареал видов. В результате негативного антропогенного влияния на морские и речные экосистемы (строительства плотин гидроэлектростанций и загрязнения местообитаний, а также перелова половозрелой части популяций браконьерами) численность осетровых рыб претерпела резкое сокращение, промысел был повсеместно запрещен [4].

В настоящее время наиболее подверженными полному исчезновению в России являются шип, сахалинский и атлантический осетры, зейско-буреинские популяции калуги и амурского осетра, обская и байкальская популяции сибирского осетра, некоторые популяции стерляди и азовская белуга [5]. Перечисленные виды и популяции включены в Красную Книгу Российской Федерации, имеют охранные статусы Международного Союза Охраны Природы. Учеными предпринимаются попытки сохранения рыб путем разведения их в аквакультуре в результате одомашнивания производителей [2].

Современное состояние популяций осетровых рыб России подвергается ежегодному мониторингу с целью изучения численности, возрастного состава и распределения по акваториям. В условиях отсутствия возможности естественного нереста, связанном с преграждением доступа к нерестилищам плотинами ГЭС, основным способом сохранения природных популяций осетровых считается искусственное воспроизводство. В аквакультуре происходит содержание и выращивание domesticированных и выращенных «от икры» производителей, получение половых продуктов, подращивание личинок. Объем ежегодного выпуска молоди в акватории России принимает существенные значения: Каспийский бассейн – более 30 млн экземпляров, Азово-Черноморский бассейн – 5 млн, бассейн Амура – 3 млн особей [3].

Для оценки успешности проводимых мероприятий с 2015 года ФГБНУ «ВНИРО» проводит масштабное генетическое мечение производителей каспийских осетровых, позволяющее точно устанавливать родительскую пару для выловленной в морских мониторинговых съемках молоди. Используя маркеры ядерной и митохондриальной ДНК, можно с точностью определить вклад

каждого осетрового рыбоводного завода в искусственное воспроизводство, оценить выживаемость молоди. Благодаря успешности проведения программы, подобное мечение было применено для байкальских и дальневосточных осетровых рыб.

Важным элементом в борьбе с нерегулируемым, незаконным и несообщаемым промыслом является молекулярно-генетическое определение вида для пищевой осетровой продукции [2]. Для всех видов осетровых, обитающих в России, определены уникальные маркеры, позволяющие с точностью устанавливать видовую принадлежность. Более того, возможно установление гибридного аквакультурного происхождения особей: популярного объекта российской аквакультуры бестера и широко распространенного в Китае гибрида калуги и амурского осетра. Подобное определение биологического вида необходимо для контроля перемещения осетровой продукции через границу, проводимого «Конвенцией о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой уничтожения» (СИТЕС).

Осетровые рыбы являются важнейшим компонентом речных и морских экосистем Северного полушария Земли. Лишь совместная деятельность стран, в ихтиофауне которых встречаются эти реликтовые рыбы, позволит изменить охранные статусы многих популяций и видов, увеличить численность природных популяций. Только применение комплексного подхода к изучению состояния популяций, такого как учеты и изучение пространственного распространения производителей и молоди, изучение миграций, сравнение генетического разнообразия ремонтно-маточных стад в аквакультуре, а также генетическое мечение производителей и молоди позволит сохранить и преумножить численность осетровых рыб в морях и реках России и мира.

Исследование генетического разнообразия осетровых рыб России проводится в рамках государственного задания ФГБНУ "ВНИРО".

Список литературы

- 1) Яржомбек А. А. Образ жизни и поведение промысловых рыб. – 2016.
- 2) Мюге Н. С. и др. Осетры: удивительные рыбы на грани уничтожения или источник деликатесных продуктов?. – 2014.
- 3) Вилкова О. Ю. Анадромные осетры России: перспективы промысла //Труды ВНИРО. – 2022. – Т. 190. – С. 14-21.
- 4) Рубан Г. И., Ходоревская Р. П., Кошелев В. Н. О состоянии осетровых в России //Астраханский вестник экологического образования. – 2015. – №. 1 (31). – С. 42-50.
- 5) Данилов-Данильян В.И. и др. Красная книга Российской Федерации (животные) // М.: РАН, Астрель. 2001. 862 с.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ МОРФОЛОГИЯ КЛЕТОК КРОВИ АФАЛИНЫ (*Tursiops truncatus*) И ТИХООКЕАНСКОГО БЕЛОБОКОГО ДЕЛЬФИНА (*Sagmatias obliquidens*)

Щербакова Е.А.¹, Есипова П.В.^{1, 2}, Ячмень В.А.^{1, 2}

¹ Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, Владивосток 690041, Россия

² НОК "Приморский океанариум" - филиал ННЦМБ ДВО РАН, Владивосток 690922, Россия

Ключевые слова: морфология клеток крови, морские млекопитающие, китообразные, океанариум, гематологический и биохимический анализ крови.

Содержание китообразных в условиях океанариумов требует тщательного подхода к контролю состояния их здоровья, в первую очередь, по причине существенных отличий от их естественной среды обитания. Представители семейства дельфиновые (Delphinidae) относятся к одним из популярных морских млекопитающих для содержания в условиях неволи. Тем не менее, некоторые аспекты, связанные с недостаточностью знаний о физиологии этих животных и их адаптации к искусственной среде океанариумов требуют тщательного исследования. Показатели крови являются одними из самых простых и основных методов контроля состояния здоровья животных. Морфологические изменения клеток крови могут свидетельствовать о наличии каких-либо отклонений в организме особи на первых этапах развития патогенеза, что делает такие исследования одним из важных методов ранней диагностики заболеваний.

Афалина обладает достаточно широким ареалом, встречи в природе многочисленны (в сравнении с другими представителями семейства), кроме этого, она является самым популярным видом, содержащимся в условиях неволи и по этой же причине наиболее изученным (*Tursiops truncatus*). Тогда как тихоокеанский белобочий дельфин (*Sagmatias obliquidens*) обладает более узким ареалом, в который входят моря с более суровым климатом, из-за чего встречи в природе более редки. В океанариумах он встречается гораздо реже, в связи с чем-менее изучен.

Оба вида отличаются не только ареалами, но и образом жизни, а также имеют ряд морфологических и физиологических отличий. Единственное место на территории России, где был получен опыт содержания тихоокеанского белобочего дельфина, является «Приморский океанариум» - филиал ННЦМБ ДВО РАН.

Цель работы - изучить и сравнить морфологические характеристики клеток крови пяти особей афалины (*Tursiops truncatus* Fabricius, 1780) и одной особи тихоокеанского белобочего дельфина (*Sagmatias obliquidens* Gill, 1865).

Исследование особенностей морфологии клеток крови проведены на дельфинах двух видов - тихоокеанский белобочий дельфин и афалина, содержащихся в стационарных условиях «Приморского океанариума» - филиала ННЦМБ ДВО РАН. Исследовали препараты мазков крови пяти особей афалины (три самки и два самца) и одной особи тихоокеанского белобочего дельфина (самец), полученные в период с 2019 по 2023 год.

Ежедневно тренеры осуществляют кормление животных предварительно размороженной рыбой и кальмаром, проводя 2-3 тренировки в день, в рацион также входили витаминно-минеральные добавки. Дельфины находятся на постоянном контроле ветеринарных врачей, которые проводят осмотр кожных покровов, оценивают состояние и поведение животных, производят забор крови для проведения клинического и биохимического анализа.

Гематологический анализ крови был проведён ведущим специалистом ветеринарного отдела «Приморского океанариума» - филиала ННЦМБ ДВО РАН на аппарате МЕК 6550k (Nihon Kohden; Япон), где определяли следующие параметры: количество эритроцитов (RBC), лейкоцитов (WBC), концентрацию гемоглобина (HGB), гематокрит (HCT), средний объем эритроцита

(MCV), среднюю концентрацию гемоглобина в эритроците (MCH), среднюю концентрацию гемоглобина в эритроцитах (MCHC), количество тромбоцитов (PLT).

Взятие крови производили ветеринарные врачи в ходе ежемесячной диспансеризации дельфинов при помощи катетеров-бабочек из вены хвостового плавника. Биологические образцы помещали в пробирки с антикоагулянтом ЭДТА. Каплю крови помещали на предметном стекле, изготавливали мазки крови, которые окрашивали по Романовскому-Гимза и исследовали на световом микроскопе Carl Zeiss при увеличении объектива 100х. Микрофотографии сделаны при помощи программы «ZEN 2».

Выявлено, что клетки крови изучаемых животных были морфологически сходны с таковыми у других видов млекопитающих. Базофилы ($15,2 \pm 1,2$ мкм), эозинофилы ($13,8 \pm 1,2$), моноциты ($15,1 \pm 1,4$ мкм) исследованной особи тихоокеанского белобочего дельфина, несколько крупнее базофилов ($12,7 \pm 0,2$ мкм), эозинофилов ($12,3 \pm 1,0$ мкм), моноцитов ($13,9 \pm 1,6$ мкм) пяти особей афалины. Тихоокеанская афалина обладает более высоким количеством лейкоцитов ($6,9 \pm 1,6 \times 10^9$ /л) и более низким количеством эритроцитов ($4,0 \pm 0,2 \times 10^{12}$ /л), в сравнении с тихоокеанским белобочим дельфином ($3,9 \pm 0,7 \times 10^9$ /л и $5,4 \pm 0,2 \times 10^{12}$ /л соответственно), что согласуется с литературными данными [1, 2]. Однако, показатели крови диких особей афалины, в отличие от исследованных пяти особей в неволе, характеризовались более высоким количеством лейкоцитов и тромбоцитов, в то время как концентрация гемоглобина, MCH, MCHC была ниже [2]. Значительных различий в показателях крови у тихоокеанского белобочего дельфина в сравнении с другими исследованиями выявлено не было.

В данной работе представлены результаты исследования морфологии и морфометрии всех клеток крови, присущих млекопитающим: эритроцитов, палочкоядерных и сегментоядерных нейтрофилов, эозинофилов, моноцитов, лимфоцитов, а также редко встречающихся базофилов. Результаты исследования предоставляют исходные данные для использования в мониторинге физиологического состояния и диагностике ранних стадий патологических процессов у морских млекопитающих.

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Федерального государственного бюджетного учреждения науки "Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского" Дальневосточного отделения Российской академии наук. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Список литературы

- 1) Lauderdale L. K., Mellen J. D., Walsh M. T., Granger D. A., Miller L. J. Health reference intervals and values for common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*), Indo-Pacific bottlenose dolphins (*Tursiops aduncus*), Pacific white-sided dolphins (*Lagenorhynchus obliquidens*), and beluga whales (*Delphinapterus leucas*) // PLOS ONE. 2021. 16(8): e0250332.
- 2) Fair P.A., Hulse, T.C., Rene, V.A., Goldstein, J.D., Adams, J., Zolman, E.S., Bossart, G.D., 2006. Hematology, serum chemistry and cytology findings from apparently healthy Atlantic bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) inhabiting the estuarine waters of Charleston, South Carolina // Aquatic Mammals. 2006. 32(2). 182–195.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ПОЛОВОЙ СИСТЕМЫ САМОК *METRIDIA LONGA* LÜBBOCK, 1854 В БЕЛОМ МОРЕ

Юрикова Д.А., Кособокова К.Н.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: каляноидные копеподы, репродуктивная система, биология размножения

Каляноидные копеподы рода *Metridia* являются массовыми представителями мезопланктона умеренных и полярных районов Мирового океана. Особенностью представителей этого рода является то, что в зимний период они не впадают в диапаузу, сохраняя активность и продолжая питаться, переходя на микрозоопланктон в условиях отсутствия растительной пищи. Еще одной особенностью этих рачков является сопоставимая численность самок и самцов во взрослой части популяций на протяжении всего года [2,5], что отличает их от многих других каляноидных копепод.

Копеподы *Metridia longa* Lübböck, 1854 являются одним из ключевых компонентов сообществ арктических морей и Центрального Арктического бассейна. Однако, несмотря на их широкое распространение и высокую численность в арктическом регионе, экология, сезонные колебания соотношения полов, динамика полового созревания взрослых самок и самцов и сезонная динамика репродуктивного цикла *Metridia longa* все еще остаются малоизученными [2,3,4].

В Белом море *M. longa* является одним из массовых представителей холодноводного комплекса видов зоопланктона. Считается, что в Белом море самки *M. longa* нерестятся с разной интенсивностью в течение почти всего года [2], и пик нереста приходится на начало осени, когда температура воды понижается [1], однако имеющиеся сведения отрывочны. В начале ледостава метридия концентрируется глубже 50 м, образуя максимум биомассы в слое от 50 до 100 м [2]. Продолжительность их жизненного цикла по имеющимся данным составляет около года [2].

Для *M. longa* характерна асимметричность процесса оплодотворения, связанная с наличием в популяции двух морфотипов самцов, которые являются зеркальным отражением друг друга – "левой" и "правой" [3]. Асимметрия самцов проявляется в положении геникулирующей антеннулы, ориентации модифицированной пятой пары грудных ног, расположении непарной гонады самцов и генитального отверстия [3]. Строение половой системы самок характеризуется двусторонней симметрией парных структур: дивертикул яичника, яйцеводов, сперматек, гонопоров и копуляторных пор. Сперматеки не соединены между собой, поэтому после спаривания с одним самцом оплодотворенной оказывается только одна из сперматек самки – левая или правая. Соотношение самок с правой и левой заполненными сперматеками и "праворуких" и "леворуких" самцов позволяет предположить, что морфотип самца определяет, в какую сперматеку с наибольшей вероятностью попадут сперматозоиды [3]. Наличие самок с двумя заполненными сперматеками предполагает осеменение двумя самцами разных морфотипов [3].

Задачей нашей работы было исследование сезонной динамики созревания гонад самок и соотношения полов у взрослых особей *M. longa* в Белом море в течение года с целью описания сезонного цикла размножения вида на фоне сезонных изменений условий среды.

Материал, использованный в работе, был отобран в Белом море с февраля по ноябрь. В большинстве случаев водную толщу облавливали вертикально сетями Джели-37 с ячейей 180 мкм по нескольким горизонтам; часть проб была взята путем тотальных ловов от дна до поверхности. Пробы зоопланктона фиксировали 4% раствором формалина. Для визуализации структур репродуктивной системы самок окрашивали витальным красителем – борным кармином – по описанной методике [4]. Во всех пробах был проведен подсчет взрослых особей *M. longa*. У самцов определяли морфотип по наличию правой или левой геникулирующей антеннулы, у самок регистрировали

заполненность правой, левой или обеих сперматек. Отдельно мы определяли стадию зрелости половой системы самок, исходя из классификации, предложенной ранее [5] и дополненной схемой T. Scherzinger (неопубл.), где стадия I характеризует незрелое состояние яичника и дивертикул, стадии II-IV – развитие ооцитов и заполнение половых протоков яйцами, готовыми к вымету, а стадия V соответствует отнерестившейся самке.

Наибольшее число взрослых особей в беломорской популяции *M. longa* было обнаружено в августе, наименьшее – в ноябре. При этом в период с середины августа по конец октября в пробах, взятых из более глубокого слоя в диапазоне глубин от 55 до 160 м, соотношение полов во взрослой части популяции было близко к 1:1, в то время как в мае оно было сдвинуто в сторону взрослых самок. В тот же период в конце весны (май) наиболее многочисленны были готовые к нересту и уже отнерестившиеся зрелые самки. При этом доля самок с созревающими гонадами постепенно возрастала в течение лета. Пик численности самок на самых ранних стадиях развития половой системы (стадия I) наблюдался в конце октября. Во все исследованные месяцы большинство самок имели только левую заполненную сперматеку, что коррелирует со значительным преобладанием самцов-"левшей" в пробах. Полученные предварительные результаты показывают, что для характеристики сезонного цикла размножения *M. longa* в Белом море необходимы более детальные сезонные исследования динамики созревания половой системы взрослых самок, соотношения полов и процесса оплодотворения.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-17-00121.

Список литературы

- 1) Кособокова К. Н., Перцова Н. М. Зоопланктон глубоководной части Белого моря в конце гидрологической зимы / К.Н. Кособокова, Н.М. Перцова // Океанология. 2005. Т. 45. № 6. С. 866–878.
- 2) Перцова, Н. М. Распределение и жизненный цикл *Metridia longa* Lubbock в Белом море [Текст] / Н.М. Перцова // Труды Беломорской Биологической Станции МГУ. 1974. Т. 4. С. 14–31.
- 3) Ershova E.A., Kosobokova K.N. Morphology of genital system and reproductive biology of the arctic calanoid copepod *Metridia longa* / E.A. Ershova, K. N. Kosobokova // Biology Bulletin. 2012. V. 39(8). P. 676-683.
- 4) Kosobokova K. N. The reproductive cycle and life history of the Arctic copepod *Calanus glacialis* in the White Sea / K. N. Kosobokova // Polar Biology. 1999. V. 22(4). P. 254–263.
- 5) Tande K. S., Grønvik S. Ecological investigations of the zooplankton community of Balsfjorden, northern Norway: sex ratio and gonad maturation cycle in the copepod *Metridia longa* (Lubbock) / K.S. Tande, S. Grønvik // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1983. V. 71. P. 43–54.

ЛЕДОВЫЕ МИКРОВОДОРОСЛИ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ В 2021 Г.

Юрикова Е.А.^{1,2}, Орлова Т.Ю.¹

¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Ключевые слова: биология океана, морской лед, ледовые микроводоросли.

Ледовые микроводоросли выступают важнейшим пищевым ресурсом в период высвобождения их в водную среду в период таяния льда [1]. Значение ледовых микроводорослей особенно важно для нашей страны в связи с тем, что льдами покрывается большая часть морских акваторий России. Не смотря на то, что географическое положение залива Петра Великого отличает его как самую южную акваторию страны, где образуется ледяной покров значительной толщины, ледовая микробиота здесь практически не изучалась. Первые комплексные исследования были проведены в 2020–21 гг. в бухтах о. Русский [2]. С 2021 г. в Амурском заливе был начат ежегодный мониторинг сообществ микроводорослей, обитающих во льду.

Полигоном для исследования ледовых микроводорослей была избрана мониторинговая станция в кутовой части Амурского залива (43°11'59" с.ш., 131°54'54" в.д.). Пробы отбирали еженедельно с 01.02 по 19.02. Керны льда извлекали при помощи кольцевого бура диаметром 15,5 см. Затем при помощи ножовки из нержавеющей стали керны нарезали на слои толщиной по 5 см. Лед помещали в стерильные контейнеры и растапливали при комнатной температуре [3], после чего талую воду отбирали в фальконы объемом 50 мл. В первую дату отбора, 1 февраля, керн имел толщину 46 см, были отобраны только три нижних слоя; 9 и 19 февраля толщина льда составляла 50 см, у обоих кернов отобрано по 10 слоев. Таким образом были получены 23 пробы из 3 кернов льда. Видовую идентификацию и количественный подсчет клеток проводили без предварительного концентрирования проб методом прямого счета в камере «Сэдживик-Рафтер» объемом 1 мл³. Дополнительную идентификацию осуществляли на сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss Sigma 300 VP (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Германия).

В результате проведенного анализа таксономического состава в морском льду был идентифицирован 51 вид из 6 классов микроводорослей. Большинство видов (40) относились к группе диатомей. Так же были встречены динофитовые (7), силикофлагелляты (1), зеленые (1), пиримимонады (1) и эвгленовые (1). Количество встреченных видов постепенно возрастало с каждой датой отбора. Численность клеток достигала 17 млн кл/л, биомасса – 28 тыс. мг/м³. Максимальное число клеток отмечено в нижних 5 см льда.

Доминировали виды: *Detonula confervacea*, *Navicula granii*, *N. septentrionalis*, *Chaetoceros socialis* f. *radians*, *Nitzschia* sp., *N. frigida*, *Plagioselmis* sp. Наибольшие численности отмечены у вида *C. socialis* f. *radians* – до 15 млн кл/л. В отличие от остальных доминирующих видов, которые концентрировались в основном в нижних 5 см льда, клетки *C. socialis* f. *radians* имели максимальную численность на глубине около 35 см.

Авторы выражают благодарность Лазарюку А.Ю. за помощь в сборе проб.

Данное исследование было поддержано Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Соглашение № 169-15-2023-002).

Список литературы

- 1) Lund-Hansen, L. C., Søgaard, D. H., Sorrell, B. K. et al. Arctic sea ice ecology: Seasonal dynamics in algal and bacterial productivity / Springer Cham, 2020. 178 p.
- 2) Юрикова Е.А., Бегун А.А. Количественная структура сообщества микроводорослей морского льда (о. Русский, залив Петра Великого, Японское море) // Морской биологический журнал Т. 7, № 2. 2022. С. 98–112.

- 3) Rintala, J-M., Piiparinen J., Blomster J. et al. Fast direct melting of brakish sea-ice samples results in biologically more accurate results than slow buffered melting // Polar Biology № 37. 2014. P.: 1811–1822.

ГЕНОТИПИРОВАНИЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ТРЕПАНГА *APOSTICHOPUS JAPONICUS* IN VIVO: НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИЗУЧЕНИЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ВИДА

Ягодина В.Д., Брыков Вл.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского г. Владивосток

Ключевые слова: морская биология, генетическое разнообразие, дальневосточный трепанг.

Дальневосточный трепанг *Apostichopus japonicus* – морское беспозвоночное животное, относящееся к типу иглокожих (Echinodermata). Эта голотурия распространена в прибрежных водах восточной Азии, где является одним из важнейших объектов аквакультуры благодаря своей пищевой ценности и широкому использованию в медицине [1].

Значимость дальневосточного трепанга привела к интенсификации его промысла и ненормированному вылову, что в конечном итоге сказалось на сокращении численности популяций трепанга в местах его обитания. На территории Приморья ведется наблюдение за изменением численности *A. japonicus*. Было показано, что средняя плотность поселений дальневосточного трепанга примерно в 20 раз ниже плотности, при которой был начат незаконный его вылов, следовательно, данный объект все еще нуждается в охране [2].

В связи с уменьшением численности видов, как правило, снижается его генетическое разнообразие. Снижение генетической изменчивости может приводить к снижению выживаемости, увеличению смертности в результате инбридинга. В настоящее время ведутся исследования по изучению запасов *A. japonicus* и восстановлению его численности, в том числе при помощи искусственного выращивания в условиях марикультуры [3]. Однако при изучении генетического разнообразия видов, чаще всего, животные умерщвляются в результате проведения эксперимента. Цель нашего исследования состояла в проверке возможности прижизненного взятия биологического материала дальневосточного трепанга для дальнейшего молекулярно-генетического анализа. С акватории Амурского залива было собрано 5 особей *A. japonicus*, биологический материал для последующего выделения ДНК взят с амбулакральных ножек у живых особей, в качестве контроля брали продольную мышцу тела. В результате получены последовательности фрагмента гена 16S рРНК и генотипы по шести микросателлитным локусам для пяти особей *A. japonicus* как при выделении ДНК с амбулакральных ножек, так и при экстракции с продольной мышцы тела, совпадения в последовательностях и генотипах составили 100%. Полученные данные свидетельствуют о возможности проведения экспериментальных исследований с последующим выпуском животных в акватории, т.е. без потери особей в популяции.

Список литературы

- 1) Oh G.-W., Ko S.C., Lee D.H. et al. Biological activities and biomedical potential of sea cucumber (*Stichopus japonicus*): a review // Fisheries and Aquatic Science. 2017. V. 20. P. 28.
- 2) Лысенко В.Н., Жариков В.В., Лебедев А.М., Долганов С.М. Современное состояние популяции дальневосточного трепанга *Apostichopus japonicus* в Дальневосточном морском заповеднике // Биология моря. 2018. Т. 44, № 2. С. 133–139.
- 3) Yan J., Jing J., Mu X., Du H., Tian M., Wang S. et al. A genetic linkage map of the sea cucumber (*Apostichopus japonicus*) based on microsatellites and SNPs // Aquaculture. 2013. V. 404–405. P. 1–7.

ПОЗДНЕГОЛОЦЕНОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЯ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА ПО ДАННЫМ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕРЕГОВЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА

Аксенов А.О.^{1,2,3}, Большианов Д.Ю.¹, Правкин С.А.¹, Лебедев Г.Б.¹

¹ФГБУ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

³Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Ладожская трансгрессия, колебания уровня воды, голоцен, береговые формы рельефа, радиоуглеродное датирование, ОСЛ-датирование, геоморфологическое профилирование, голоцен.

Проблема изменений уровня Ладожского озера в голоцене остается предметом дискуссий уже на протяжении нескольких десятилетий. Предполагается существование двух трансгрессий. Первая произошла в раннем голоцене, максимального уровня подъем воды достиг 8200 14С л.н. [1]. Вторая трансгрессия, называемая «Ладожской», имела место в позднем голоцене. Около 3100-2800 14С л.н. произошла максимальная стадия этой трансгрессии, в результате чего произошел прорыв и образование реки Невы [2,3]. После чего уровень опустился до современного. Задачей настоящего исследования является оценка параметров изменений уровня во время максимума Ладожской трансгрессии и последующей регрессии: максимальной высоты трансгрессии, скорости снижения уровня, малоамплитудных осцилляций во время регрессии.

Для этого были выполнены исследования на двух участках побережья Ладожского озера: Тайпаловский залив на западном берегу и Сторожненский полуостров на южном. Эти объекты характеризуются хорошо выраженными береговыми формами рельефа, береговые валы, бары, террасы. В полевые работы входили геоморфологическое профилирование, изучение геологического строения торфяников и береговых форм с последующим пробоотбором. В последующем отобранные образцы проанализированы на диатомовый анализ, радиоуглеродное и ОСЛ-датирование.

В результате проведенных работ установлено, что на Сторожненском полуострове высоте максимального уровня Ладожской трансгрессии соответствует положение подножия наиболее высоко расположенного берегового вала на отметке 16,5 м. Возраст формирования этого вала, по результатам ОСЛ-датирования, составил $2,9 \pm 0,2$ тыс. л.н., что соответствует максимуму Ладожской трансгрессии. Ниже, на высоте 7-9 м сформирована аккумулятивная терраса, осложненная параллельными береговыми валами. Возникновение этой поверхности связывается со стабилизацией уровня с наращиванием береговых валов вследствие поступления большого количества материала. Ближе к бровке террасы средняя высота положения береговых валов несколько увеличивается, что может быть связано с незначительным подъемом уровня воды.

В Тайпаловском заливе изначально предполагалось, что уровню максимальной стадии Ладожской трансгрессии соответствует терраса на высоте 15-16 м. У бровки этой террасы расположен береговой бар высотой 5 м. Его образование так же связывалось с результатом колебаний уровня воды в последнюю трансгрессивную фазу. Однако по результатам датирования отложений торфяников, сформированных на этой террасе, установлено, что здесь воды озера в позднем голоцене не проникали выше 15 м. Ниже от берегового бара наблюдается наклонная поверхность, расчлененная береговыми валами высотой 1-2 м. Однако здесь не фиксируется поверхность, подобная 7-9-метровой террасе Сторожненского полуострова. Строение геоморфологического профиля свидетельствует о постепенном, линейном понижении уровня воды вплоть до современного уреза.

Таким образом, мы приходим к выводу, что изменения уровня на двух участках, расположенных в разных частях Ладожского озера, отличаются друг от друга. Если на Сторожненском полуострове высота максимальной стадии Ладожской трансгрессии составляет 16,5 м, то в Тайпаловском заливе она не превышала 15 м. Кроме того, геоморфологическое строение берега Сторожненского полуострова свидетельствует о стабилизации уровня воды в ходе позднеголоценовой регрессии. Признаков подобных колебаний на побережье Тайпаловского залива не обнаруживается. Причины подобных различий могут быть разными. На положение высоты береговой линии максимальной стадии Ладожской трансгрессии вероятно оказывают влияние вертикальные тектонические движения, проявляющиеся на всем северо-западе России. Различия геоморфологических профилей могут быть связаны с изменениями количества наносов и их источников.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00273, <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Список литературы

- 1) Кошечкин Б.И., Экман И.М. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера // Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера. Санкт-Петербург: РГО, 1993. С. 49–60.
- 2) Malachovskij D.B., Delusin I.V., Gej N.A., Dginoridze R.N. Evidence from the Neva River Valley, Russia, of the Holocene history of Lake Ladoga // Fennia.1996. V.174, № 1. P. 113–123.
- 3) Saarnisto M. Late Holocene land uplift/neotectonics on the island of Valamo (Valaam), Lake Ladoga, NW Russia // Quaternary International. 2012. V. 260. P. 143–152.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ (НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА МАТЕРИАЛА ЛЕДОВОГО РАЗНОСА)

Баженев И.И., Василенко Ю.П., Горбаренко С.А.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

Ключевые слова: хребет Ширшова, морская изотопная стадия, ледовый разнос, донные осадки.

Изучение Берингова моря играет важную роль в понимании климатических изменений, происходящих в Дальневосточном регионе и в определении тенденций их развития. Реконструкция ледовых условий Берингова моря позволяет понять климатические изменения в регионе в прошлом, что в свою очередь необходимо для прогнозирования будущих климатических трендов. Она полезна для оценки потенциальных рисков и уязвимостей в связи с изменением климата. Изменение ледовых условий во времени, определение прямых и обратных связей между ними, атмосферной циркуляцией и гидрологическим режимом северотихоокеанского региона, имеет особое значение для понимания как региональной, так и глобальной климатической системы. К сожалению, существующих рядов прямых наблюдений недостаточно. Поэтому изучение ледовых палеоусловий имеет особую важность. Целью данных исследований являлась реконструкция ледовых условий западной части Берингова моря в позднем плейстоцене-голоцене.

Материалом для исследования послужил керн донных осадков LV76-26-2. Данный керн был отобран в Беринговом море в районе подводного Хребта Ширшова в ходе выполнения Российско-Китайской морской научно-исследовательской экспедицией на борту НИС «Академик М. А. Лаврентьев» (рейс №76). Координаты станции отбора 56°58. 9' с.ш., 170°39.5' в.д. Глубина моря на станции отбора 1165 м. Выход керна 807 см.

Возрастная модель этого керна была построена на основе мультипараметрического подхода. На основании данных по палеопродуктивности, изотопной геохимии, яркости и магнитной восприимчивости, были выделены границы морских изотопных стадий (МИС): МИС 1 - МИС 5 (130 тыс. лет), далее на основании этих же индикаторов были выделены наиболее яркие и продолжительные интерстадиалы (ИС) 8, 12, 14, 17, 19, 21, 24 – периоды резких климатических потеплений продолжительностью от нескольких столетий до 1000 –2000 тыс. лет. На основании палеомагнитных данных были выявлены события, отвечающие палеомагнитным экскурсам Laschamp и Blake. В итоге были получены реперные точки для расчёта скоростей осадконакопления.

Для реконструкции ледовых условий западной части Берингова моря были произведены подсчёт содержания материала ледового разноса (МЛР) и расчёт потоков МЛР в керне LV76-26-2 (403 образца). Материал ледового разноса является уникальным индикатором ледовых условий в прошлом и является надежным инструментом для проведения их реконструкций. Он представляет собой захватываемое в мелководной зоне вещество, которое переносится на значительное расстояние морскими льдами. При последующем таянии вещество осаждается на морское дно и сохраняется длительное время без изменений. Изучение содержания МЛР в донных осадках позволяет оценить объёмы формирования льда, суровость ледовых условий и направление дрейфа льда. Это также позволяет реконструировать атмосферную циркуляцию над исследуемым регионом в холодное время года.

Анализ данных о содержании материалов ледового разноса показывает значительные колебания по длине керна. Наибольшие концентрации материала ледового разноса отмечаются у подошвы керна в начале МИС5, когда были наиболее мягкие климатические условия. Наименьшие концентрации МЛР отмечаются в верхней части керна, соответствующей периодам МИС2 и МИС1.

Наиболее высокие концентрации МЛР связаны с теплыми МИС, за исключением МИС 1. В холодные МИС концентрации МЛР не так высоки. В целом, можно сделать вывод, что наиболее суровые ледовые условия в Беринговом море за последние 130 тыс. лет отмечаются в теплые периоды МИС5.5 и МИС3, а мягкие ледовые условия были характерны для холодных МИС2 и МИС4 [1].

Кроме того, были проведены сравнения с данными изучения материала ледового разноса в керне LV28-44-4, отобранного в восточной части Охотского моря у западного побережья Камчатки [2,3]. Результаты показывают схожий рисунок изменения содержания МЛР. Сопоставление с индексом циркуляции показывает, что резкие пики значений МЛР связаны с усилением интенсивности Сибирского антициклона и происходят во время событий резкого похолодания климата. Таким образом видно, что всплески концентрации МЛР в западной части Берингова моря так же, как и в восточной части Охотского моря контролировались атмосферными процессами.

Суровые ледовые условия в западной части Берингова моря в периоды МИС2 и МИС4 могут быть обусловлены преобладанием геострофических северо-восточных и северных ветров, которые сталкивают лед к восточному побережью Камчатки. Это приводит к образованию тяжелых ледовых условий. С другой стороны, в течение МИС1 и МИС5.5 наблюдались более мягкие ледовые условия в западной части Берингова моря. Это может быть связано с юго-западными геострофическими ветрами, которые переносят тепло из Тихого океана, а также с активностью Алеутского циклона. Эти факторы способствуют формированию мягких ледовых условий. Сравнение с реконструкцией ледовых условий в Охотском море подтверждает роль ветровых процессов и переноса тепла в формировании ледовых условий в Беринговом море.

Исследования в данной работе выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-17-00118).

Список литературы

- 1) Палеоклиматы и палеоландшафты внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен // Атлас-монография. Под. ред. профессора А. А. Величко. Москва, 2009. – 120 с., + 24 с. цв. карт.
- 2) Vasilenko Yu.P., Gorbarenko S.A., Artemova A.V., Shi X., Liu Y.-G., Zou J., Yanchenko E.A., Toporova S.I. Orbital-scale changes of sea ice conditions of Sea of Okhotsk during the last glaciation and the Holocene (MIS 4–MIS 1) // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, Vol. 533, P. 109284
- 3) Vasilenko Yu.P., Gorbarenko S.A., Bosin A.A., Shi X., Chen M.-T., Zou J., Liu Y., Artemova A.V., Yanchenko E.A., Savenko M.P. Millennial mode of variability of sea ice conditions in the Okhotsk Sea during the last glaciation (MIS 4–MIS 2) // *Quaternary international*, 2017, Vol. 459, P. 187-20

ПРИРОДА ИСТОЧНИКОВ МАГНИТНЫХ АНОМАЛИЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНО-ИНДИЙСКОГО ХРЕБТА

Веклич И.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Восточно-Индийский хребет, линейные магнитные аномалии

Восточно-Индийский хребет (ВИХ) является уникальной структурой Мирового океана. Он отличается строгой прямолинейностью, присущей поднятию на всем протяжении от 35° ю.ш. до 10° с.ш. Хребет разделяет регион на две котловины, Центральную к западу и Вартон к востоку. Оба бассейна имеют принципиально разный структурно-морфологический рисунок, обусловленный различной историей формирования блоков литосферы обрамляющих хребет. Считается, что ВИХ образован магматизмом стационарной горячей точки Кергелен на поверхность дрейфующей с юга на север Индийской плиты. В первую очередь на это указывает фактический материал, поднятый в 7 скважинах глубоководного бурения вдоль хребта. Несмотря на стройность теории, она содержит ряд допущений, связанных с малочисленностью геолого-геофизических данных в северо-восточной части Индийского океана. Другим важным вопросом в эволюции ВИХ остается, присутствие или отсутствие здесь следов наложенного (вторичного) магматизма.

Одним из ключевых методов используемого для расшифровки генезиса ВИХ и эволюции котловин, являются геомагнитные исследования. Идентификация хронов дает возможность определить возраст океанической коры, а интерпретация локальных магнитных аномалий над подводными вулканами позволяет оценить их палеошироту образования и геологические параметры. В качестве объекта исследований был выбран участок хребта с координатами 87.5° - 92.5° в.д., 0.85° - 4° с.ш., характеризующийся наличием густой геомагнитной съемки, как минимум, 3-х экспедиций. В 1982-83гг. здесь были проведены геолого-геофизические работы в 20,22 рейсах НИС «Морской геофизик» [1,2], а в 2007 и 2017 годах экспедиции НИС «Роджер Ревелл» (США) и НИС «Академик Борис Петров» [3], в последнем автор принимал непосредственное участие. По результатам экспедиций, в совокупности с данными базы Geodas[4], была синтезирована детальная карта АМП для широкой полосы океанского дна.

В плане полигон приурочен к поднятию ВИХ и дну прилегающих глубоководных котловин. Хребет состоит из четырех блоков, разделенных седловинами. Хребту соответствует неоднородное, сильно интерферирующее АМП. Над седловинами прослеживается субширотный тренд в простирании цепочек положительных и отрицательных аномалий. В котловинах наблюдаются линейные палеоаномалии, идентифицированные ранее[2]. В Центральной, хорошо прослеживается линейная аномалия С32п.1п. По меридиану 88° в.д. происходит разрыв ее оси и смещение звеньев на расстояние ~10-15 км, что указывает на наличие здесь разломной зоны, образованной еще в период спрединга. Хрон С32п.1п уникален тем, что прослеживается дальше к востоку в пределы ВИХ, т.е. здесь плюмовый магматизм не разрушил полностью спрединговые магнитные аномалии.

К востоку от хребта в котловине Вартон наблюдается более сложная картина. Здесь выделяется как минимум четыре линейные аномалии С28г, С29п, С30п, С31г смещенные относительно друг друга разломной зоной ССВ простирания. На развитие здесь РЗ указывает не только разрыв осей аномалий, но и маркирующая ее линейная аномалия с размахом до 100 нТл. Отражение разлома в АМП, скорее всего, связано с протеканием вдоль него процессов серпентинизации. А сама разломная зона разделяет участки дна с разницей возраста ~7 млн лет.

На восточном склоне ВИХ четко выделяется локальная коническая гора, характеризующаяся интенсивной дипольной магнитной аномалией. В гравитационном поле ей соответствует изометричный минимум силы тяжести в редукции Буге. Это предполагает мощную корневую структуру горы. На сейсмических разрезах, пересекающих эту гору видно, что вершина возвышенности не

эродирована и не перекрыта осадками. Для изучения свойств этого интересного объекта, была построена адекватная ему модель, путем подбора эквивалентного по полю источника, воспроизводящего характеристики и структуру АМП. Определение по спектральному площадному анализу средней глубины до верхней кромки и центра магнитных масс показало, что основной интервал глубин, в котором располагаются источники аномалии, составляет 3.3–6.5 км от уровня моря. Эти оценки указывают на наличие у исследованной горы глубокого магнитоактивного корня и, следовательно, на ее вулканическую природу. Чтобы определить место и время образования подводной горы решалась линейная обратная задача относительно среднего вектора намагниченности объекта (палеомагнитная задача о направлении намагниченности горы) [5]. Согласно полученным оценкам, тело имеет наклонение вектора намагниченности 16.2° , что соответствует палеошироте образования его (термоостаточной) намагниченности 8.3° ю.ш. Из этого следует, что объект образовался в приэкваториальной зоне. С учетом скорости дрейфа Индийской плиты в конце палеогена-неогене, ее возраст оценивается в 30 млн лет. Склонение намагниченности близко к 135.5° , согласно палеорекострукции региона и рассчитанной палеошироте, гора образовалась после вращения Индийской плиты, поэтому напрашивается вывод о северо-восточном простирании корневой структуры горы, создающей магнитную аномалию того же простирания.

Нами были выделены и уточнены границы ранее идентифицированных на полигоне аномалий. Крыло линейной аномалии С32п.1п. прослеживается в пределы ВИХ. В пределах Центральной котловины выделен и трассирован разлом, по которому смещены оси линейных аномалий. С помощью подбора эквивалентного по полю источника (модели) изучены свойства подводной горы. По нашим суждениям, она сформировалась в результате наложенного «молодого» вулканизма в приэкваториальной зоне. Гора имеет глубокий корень СВ простирания.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН по базовой теме № FMWE-2024-0019

Список литературы

- 1) Сычев П.М., В.М. Воробьев, Л.М. Лютая, В.Н. Патрикеев, А.А. Попов, В.В. Ревердатто, В.В. Соинов. Складчатые деформации осадочного чехла юго-запада Бенгальского залива (Индийский океан) // Тихоокеанская геология. 1987, №1. С.25-37.
- 2) Шрейдер А.А. Геомагнитные исследования Индийского океана. - М.: Наука, 2001. 319 с.
- 3) Веклич И.А., Иваненко А.Н., Левченко О.В. Аномальное магнитное поле ΔT_a экваториальной части Индийского океана (съёмка на полигонах) // Вестник КРАУНЦ, 2020, №1, Выпуск 45, С.17-37. DOI: 10.31431/1816-5524-2020-1-45-17-37.
- 4) National Geophysical Data Center (NGDC), <https://www.ngdc.noaa.gov/>.
- 5) Иваненко А.Н. Моделирование магнитного поля подводных гор // Магнитное поле океана / Под ред. Городницкого А.М. М. Наука. 1993. С. 68–88.

ОЦЕНКА ВКЛАДА ВОЛНОВОЙ АСИММЕТРИИ В ДИНАМИКУ ФРАКЦИЙ НАНОСОВ В БЕРЕГОВОЙ ЗОНЕ КАЛАМИТСКОГО ЗАЛИВА

Гуров К.И., Фомин В.В.

ФГБУН ФИЦ "Морской гидрофизический институт РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: Каламитский залив, береговая зона, наносы, фракционный состав, модель *XBeach*, асимметрия волн

Прибрежные районы являются зонами активной антропогенной нагрузки, а также интенсивных гидро- и геодинамических процессов. Морфология пляжа и береговой линии очень динамична и во многом определяется волнами, течениями и региональными характеристиками наносов [1]. Известно, что изменение высших моментов движения волн (асимметрия, эксцесс и др.) по мере приближения волн к берегу определяет характер обрушения волн, генерацию инфрагравитационных волн и волновых течений, процессы взвешивания и транспорта наносов [2]. Кроме того, размер частиц донных наносов и их пространственное распределение являются ключевыми параметрами при характеристике наносов и математическом моделировании морфодинамики песчаных пляжей. Актуальность изучения динамики гранулометрических фракций донных наносов на побережье Каламитского залива в районе пересыпи Сакского озера обусловлена значительным увеличением темпов освоения данного региона, а также отсутствием современных знаний и точных оценок характеристик литодинамических процессов на этом участке.

Целью настоящей работы является изучение локальных особенностей перераспределения различных фракций наносов в прибрежных зонах Каламитского залива в районе косы Сакского озера под воздействием штормовых волн с учетом влияния волновой асимметрии.

Исследуемая в настоящей работе область включала участок береговой зоны Каламитского залива, расположенный в центральной части пересыпи оз. Сакское между базами отдыха «Солнечный берег» и «Парус» и охватывающий всю территорию береговой зоны санатория «Полтава-Крым». В центральной части изучаемого участка береговой зоны расположены два берегозащитных сооружения в виде бетонных бун длиной 37 м в южной части и 54 м в северной части.

Для изучения влияния волновой асимметрии на динамику гранулометрического состава донных наносов использовалась комплексная численная модель *XBeach* [3]. Рассматривались профили расчетных характеристик на 4-х участках исследуемого района: в южной части – $y = 200$ м, в центральной части в межбунном пространстве санатория «Полтава-Крым» – $y = 500$ м, к северу от берегозащитных сооружений – $y = 800$ м, в крайней северной части – $y = 1000$ м. Оценивалось влияние на результаты модельных расчетов значений параметра *facua*, определяющего вклад нелинейности (асимметрии волн) в суммарный транспорт наносов в береговой зоне.

Модель *XBeach* использовалась с горизонтальным разрешением 4 м. На мористой границе расчетной области волнение задавалось в виде спектра *JONSWAP*, куда в качестве параметров входили высота значительных волн (hs) и пиковый период волн (Tp). Рассматривалось 3 варианта штормов: шторм 1 – $hs = 1,54$ м; $Tp = 8,6$ сек; шторм 2 – $hs = 2,04$ м; $Tp = 9,2$ сек; шторм 3 – $hs = 2,54$ м; $Tp = 9,8$ сек. Указанные характеристики штормов были выделены на основе данных реанализа волнения *ERA* 1979–2021 гг. Период действия шторма составлял 12 ч.

Результаты моделирования показали, что эволюция профиля береговой зоны для всех рассмотренных штормов приводит к эрозионному разрушению пляжей и выполаживанию подводного склона в приурезовой полосе. Размываемый материал перемещался мористее и накапливался, образуя подводный бар. Выявлено, что для участков, расположенных в крайней южной ($y = 200$ м) и крайней северной ($y = 1000$ м) частях исследуемого района, изменения морфодинамики подводного берегового склона происходили в пределах 100-метровой зоны, ограниченной изобатой 2,5–2,7 м. Полоса переформирования рельефа дна расширялась с изменением величины параметра *facua*.

С увеличением параметра *facua* интенсивность эрозионного воздействия на береговую зону сокращается, однако даже с увеличением значений до 0,5 деформация профиля как в зоне пляжа, так и в морской части подводного берегового склона сохраняется. В результате, на профилях $y = 200$ и $y = 800$ м через 12 часов действия шторма при $facua = 0,5$ происходит размыв в центральной части пляжа и переотложение материала в приурезовой полосе. Для центральной части береговой зоны в межбунном пространстве санатория «Полтава-Крым» ($y = 500$ м) размыв профиля происходит как в зоне пляжа, так и в приурезовой части подводного берегового склона, а величины размыва в мористой части с увеличением значения параметра *facua*, наоборот, возрастают. Для крайнего северного участка ($y = 1000$) размыв верхней части профиля береговой зоны сохраняется при больших значениях *facua*.

Установлено, что уменьшение доли мелкозернистого песка в береговой зоне определяется изменением угла наклона дна, особенно в северной части района исследований. Выявлено, что вблизи береговой линии основной вклад в изменчивость результирующего параметра, характеризующего гранулометрический состав смеси вносит мелкозернистый гравий и крупнозернистый песок, а основное перераспределение гранулометрических фракций происходит вблизи берега на участке, ограниченном изобатой 2,5–3 м, а по ширине не превышает 150 м, что согласуется с другими исследованиями, выполненными на разных участках береговой зоны Каламитского залива [4]. Установлено, что для исследуемого района оптимальное значение *facua* находится в пределах 0,3–0,4.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования».

Список литературы

- 1) McNinch, J. Geologic control in the nearshore: shore-oblique sandbars and shoreline erosional hotspots, Mid-Atlantic Bight, USA // Marine Geology. 2004. Vol. 211, iss. 1-2. P. 121–141.
- 2) Динамические процессы береговой зоны моря. (Под ред. Р.Д. Косьяна, И.С. Подымова, Н.В. Пыхова). – М.: Научный мир, 2003. – 320 с.
- 3) Roelvink, D. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands / D. Roelvink, A. Reniers, A. Van Dongeren, J. Van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski // Coastal Engineering. 2009. № 56. P. 1133–1152
- 4) Gurov, K.I., Udovik, V.F., Fomin, V.V. Modeling of the coastal zone relief and granulometric composition changes of sediments in the region of the Bogaily Lake bay-bar (the Western Crimea) during storm // Physical Oceanography. 2019. Vol. 26(2). P. 170–180.

ПОТОКИ ВЕЩЕСТВ И СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ НА СЕВЕРНОМ ШЕЛЬФЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Гуров К.И., Кременчуцкий Д.А., Журавлева А.А.

ФГБУН ФИЦ "Морской гидрофизический институт РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: донные отложения, гранулометрический состав, органический углерод, цезий-137, калий-40, радий-226, свинец-210, скорость осадконакопления, радионуклиды, седиментация

Прибрежные акватории подвержены значительной антропогенной нагрузке, изменяющей скорость протекания геохимических процессов и приводящей к загрязнению донных отложений. Орография берега и рельеф дна, гидродинамический режим акваторий, а также расположение различных источников поступления терригенного и биогенного материала – основные факторы, определяющие пространственную неоднородность скоростей осадконакопления на шельфе Черного моря в целом и Крымского п-ова в частности. В отличие от гидролого-гидрохимических и гидрооптических характеристик вод в прибрежных районах Крымского полуострова, которые в настоящее время исследуются на регулярной основе, изучению донных отложений уделяется мало внимания, а информация о современных скоростях осадконакопления и вовсе отсутствует. Однако именно данные о скоростях осадконакопления позволяют проследить особенности поступления и накопления в донных отложениях различных загрязняющих веществ и оценить изменение во времени природных и техногенных процессов. Одним из способов оценки скоростей осадконакопления является исследование вертикального распределения в толще донных отложений различных радионуклидов. Так неоднородность поступления и накопления радионуклидов в различных по своему гранулометрическому и вещественному составу донных отложениях позволяет оценивать потоки различных веществ, в том числе антропогенного происхождения.

Цель работы – получить количественные характеристики пространственной и вертикальной изменчивости концентрации свинца-210, радия-226, цезия-137 и калия-40 в пробах донных отложений, оценить пространственную неоднородность скоростей осадконакопления и потоков веществ на северном шельфе Черного моря.

Используемые в данной работе натурные данные были получены в ходе рейсов на НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»). Отбор проб колонок донных отложений производился с помощью ручного пробоотборника и акриловой грунтовой трубки с внутренним диаметром 60 мм и вакуумным затвором. Этот пробоотборник позволяет отбирать колонки длиной от 16 до 40 см в зависимости от типа осадка (в случае иловых осадков – колонки более длинные, в случае ракушки – более короткие).

Работы, связанные с получением скоростей осадконакопления по данным о вертикальном распределении цезия-137, были расширены путем добавления метода датировки по паре радионуклидов свинец-210 – радий-226 (модель постоянного потока и скорости седиментации [1]). Такая необходимость возникла по причине сильной пространственной изменчивости скоростей седиментации в результате чего, на некоторых станциях, ярко выраженный пик активности цезия-137 не был обнаружен (колонку поделили по 1 см, и оказалось, что этот 1 см соответствует периоду в 20 лет). Использование пары радионуклидов свинец-210 – радий-226 позволяет оценить скорость осадконакопления за больший промежуток времени (100–150 лет), чем по цезию-137 (36–66 лет). Пробы донных осадков просушивались и упаковывались в пластиковые виалы, в которых они запаивались воском и выдерживались в течение 24-х дней. За это время наступало равновесие между активностью радия-226 и свинцом-214/висмутом-214, по активности последних и определялась активность радия-226. Измерения активности радионуклидов выполнялись на низкофоновом

гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) колодезного типа. Время измерения единичной пробы – 24 часа. Определения скоростей осадконакопления были выполнены на 12 станциях. Работы были расширены путем дополнительного получения оценок седиментационного потока.

Анализ полученных результатов показал, что вертикальное распределение радионуклидов в колонках донных отложений имеет сложный характер. Результаты проведенного корреляционного анализа указывают на то, что такая пространственная изменчивость связана с неоднородностью гранулометрического состава и содержания органического углерода в донных осадках.

Скорость осадконакопления и седиментационный поток изменялись в интервалах от 0,3 до 1,6 мм/год и от 162 до 986 г/м² год соответственно. Максимальные величины были отмечены на станциях, расположенных на мелководье вблизи берега, минимальные – на станциях, расположенных на приглубых станциях на шельфе.

Исследование было проведено в рамках гранта, выданного Российским научным фондом (№ 22-77-10056).

Список литературы

- 1) Кременчуцкий Д. А., Гурова Ю. С. Факторы формирования пространственного распределения природных и техногенных радионуклидов в донных отложениях Камышовой бухты, Севастополь // Морской гидрофизический журнал. 2023. Т. 39, № 5. С. 692–707.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ КОНТИНЕНТАЛЬНОГО ШЕЛЬФА ЮЖНО-КИТАЙСКОГО МОРЯ

Еськова А.И.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, Россия

Ключевые слова: донные отложения, бактерии, Южно-Китайское море

Изучению Южно-Китайского моря (ЮКМ) посвящены работы российских, вьетнамских, немецких, французских, японских и других международных научных и производственных организаций. Микробиологические исследования донных отложений ЮКМ сосредоточены, как правило, на изучении таксономического разнообразия микроорганизмов в донных осадках в целом, и в местах выхода газа [2,3,4,5].

Основная цель настоящего исследования – изучить группы микроорганизмов – сульфатредуцирующие, нефтеокисляющие, метанотрофные, населяющие донные отложения с использованием традиционных и молекулярных методов, а также проследить их связь с образованием аутигенной минерализации в осадках.

Нами проведены геомикробиологические исследования донных отложений 56 станций континентального шельфа ЮКМ трех мало изученных до настоящего времени районов: бассейна Нам Кон Сон (район 1), бассейна Фу Хань (район 2) и бассейна Красной реки (район 3).

В результате проведенных геомикробиологических исследований в акватории ЮКМ было установлено присутствие в донных отложениях сульфат-редуцирующих, нефтеокисляющих и метанотрофных бактерий.

Район 1. На станции LV88-03GC наблюдалась наибольшая численность метанотрофных микроорганизмов (2×10^4 кл/г), отмечено присутствие сульфат-редуцирующих микроорганизмов [1]. Ген, кодирующий β -субъединицу диссимиляционной (би) сульфит-редуктазы (*dsrB*) – ключевой фермент метаболизма всех сульфат- и сульфит-редуцирующих микроорганизмов, отвечающий за превращение сульфита в сульфид, обнаруживался в пробах четырех станций: LV88-01GC, LV88-02/1GC, LV88-03GC, LV88-08GC.

Район 2. На станции LV88-20/1GC было отмечено наличие сульфат-редуцирующих микроорганизмов по всей длине отобранного керна; их максимальная численность составила $3 \times 10^4 \times 10^4$ кл/г. На станции LV88-42GC в керне осадка обнаружены сразу три исследуемые группы микроорганизмов: метанотрофные, нефтеокисляющие и сульфат-редуцирующие [1]. Метанотрофы встречались на глубинах больше 800 м. Гены – индикаторы сульфат-редуцирующих микроорганизмов (*dsrB*) отмечены в пробах донных отложений станций: LV88- 20/1GC, LV88-27GC, LV88-46GC.

Район 3. На станциях LV88-55GC и LV88- 56GC отмечается присутствие сульфат-редукторов, но с небольшой численностью (10 кл/г), в сравнении с вышеописанными районами [1]. В пробах донных отложений этого района, гены *dsrB* были обнаружены на станциях: LV88-50GC, LV88-53GC, LV88-55GC. Присутствие указанных групп бактерий в различных сочетаниях указывает на разные условия генезиса и накопления органического вещества. Это позволяет изучать, в частности, процессы интенсивного восстановления сульфата и выделения сероводорода, который, в свою очередь, вступая в реакцию с ионами железа, образует сульфиды железа. Полученные данные подтверждают активное участие сульфат-редуцирующих сообществ в процессах образования аутигенных сульфидов в осадочных отложениях. На станциях LV88-23GC, LV88-25GC, LV88- 32GC, где были получены положительные величины $\delta^{34}S$ в пирите, присутствие сульфат-редуцирующих сообществ не установлено. Представленные результаты требуют продолжения геомикробиологических исследований.

Работа выполнена в рамках гостемы «Комплексные исследования состояния природной среды и минеральных ресурсов Мирового океана на основе геохимических, геологических и геомикробиологических индикаторов», научн. рук. Сырбу Н.С. Регистрационный номер: АААА-А19-119122090009-2

Список литературы

- 1) Еськова А.И., Пономарева А.Л., Легкодимов А.А., Калгин В.Ю., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Особенности распределения индикаторных групп микроорганизмов в донных отложениях Южно-Китайского моря // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2020. Т. 33. С. 33-43.
- 2) Chen R.-W., He Yu. -Q., Cui L.-Q., Li C., Shi S.-B., Long Li-J., Tian X.-P. Diversity and distribution of uncultured and cultured gaiellales and rubrobacterales in South China Sea sediments // *Frontiers in Microbiology*, 2021, vol. 12. pp. 1213. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.657072>
- 3) Graw M.F., D'Angelo G., Borchers M., Thurber A.R., Johnson J. E., Zhang C., Liu H., Colwell F.S. Energy gradients structure microbial communities across sediment horizons in deep marine sediments of the South China Sea // *Frontiers in Microbiology*, 2018, vol. 9, pp. 1-12. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00729>
- 4) Xia Ch., Li Yi, Dang Y., Cha Q., He X., Qin Q. Diversity of culturable and in situ bacteria in surface seawater from the central Indian Ocean and the western South China Sea. *Biodiv Sci*, 2022, vol. 30(1), pp. 21407.
- 5) Zhu D., Hosoi-Tanabe Sh., Yang Ch., Zhang W. Sun J. Bacterial Community Composition of South China Sea Sediments through Pyrosequencing-Based Analysis of 16S rRNA Genes. *PLOS ONE*, 2013, vol.8, pp.e78501. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078501>.

ИКАИТ В ОСАДКАХ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Крылов А.А.^{1,2}, Логвина Е.А.¹, Зыков Е.А.¹

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург

²Институт Наук о Земле, Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: икаит, Арктические моря, изотопы углерода, изотопы кислорода, ранний диагенез.

Икаит - редкая метастабильная форма шестиводного карбоната кальция $\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

За последний век природные икаиты обнаружены в разнообразных гидрохимических обстановках – заливах, дельтах, соляных озерах, в морских, озерных, карстовых льдах и даже в продуктах. География распространения этого минерала за это время также расширилась и охватывает не только различные акватории Мирового океана, но и внутренние моря и озера.

В Арктическом регионе, икаиты обнаружены практически во всех акваториях: в Гренландском море, во фьорде Икка, юго-запад Гренландии [1 и др.], в Чукотском в прибрежье Аляски [2 и др.] и Чукотки [3], в Канадском Арктическом архипелаге у о. Аксель-Хейберг [4 и др.], в морях Лаптевых [5 и др.] и Карском [6 и др.], по не опубликованным данным в Баренцевом и Восточно-Сибирском морях.

Особое внимание к изучению икаита связано с тем, что более распространенные и встречающиеся в фанерозойских породах его псевдоморфозы – глендониты – предполагают использовать в качестве индикаторов периодов похолодания климата. Тем не менее, процесс преобразования икаита в кальцит до сих пор до конца не изучен.

С целью выявления особенностей формирования икаита в условиях раннего диагенеза, нами были изучены образцы, отобранные из осадков Карского моря, моря Лаптевых и Чукотского. Проведены: изотопный анализ углерода, кислорода и водорода (1) не преобразованных икаитов (при низких температурах), (2) поровых вод (отобранных из вмещающих икаиты отложений), (3) воды входящей в кристаллическую решётку гидрата; рентгеноструктурный и терморентгенофазовый анализы.

Изучение процессов трансформации икаита в кальцит, показали, что преобразование проходит либо через ватеритовую фазу, либо напрямую минуя промежуточные фазы.

Результаты исследований изотопного состава углерода позволили установить, что основными механизмами, способствующими кристаллизации исследованных нами икаитов, являлись Органокластическая СульфатРедукция (ОСР) и Анаэробное Окисление Метана (АОМ). Численное моделирование источников углерода позволило оценить вклад того или иного углеродного компонента в процессе формирования икаитов. В ряде случаев, существенно преобладали процессы АОМ, что позволило нам выделить древние очаги разгрузки углеводородных флюидов (палеосипы).

В связи с тем, что значения изотопного состава кислорода карбонатов зависят от значений $\delta^{18}\text{O}$ вод и температуры, нами были рассчитаны их теоретические величины и проведено численное моделирование. Анализируя полученные значения для всех трех акваторий в целом, можно заключить, что формирование икаита происходило при температурах близких к современным. Источников кислорода воды при формировании икаитов являлась смесь морских и опресненных воды в зависимости от той или иной акватории.

Исследования поддержаны грантом РФФ № 23-27-00457.

Список литературы

- 1) Tollefsen E., Balic-Zunic T., Morth C.-M., Bruchert V., Lee C.C., Skelton A. Ikaite nucleation at 35 ° C challenges the use of glendonite as a paleotemperature indicator // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64751-5>.
- 2) Shearman D., McGugan A., Stein C., Smith A. Ikaite, CaCO₃·6H₂O, precursor of the thinolites in the Quaternary tufas and tufa mounds of the Lahontan and Mono Lake Basins, western United States // *GSA Bull.* 1989 V. 101. P. 913–917. DOI: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0913:ICOPOT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0913:ICOPOT>2.3.CO;2).
- 3) Крылов А.А., Логвина Е.А., Зыков Е.А., Урванцев Д.М., Семенов П.Б., Малышев С.А., Гусев Е.А. Механизмы формирования икаита в донных отложениях Арктического шельфа // *Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. – М.: ИО РАН. 2023. С. 92–95.*
- 4) Omelon C.R., Pollard W.H., Marion G.M. Seasonal formation of ikaite (CaCO₃·6H₂O) in saline spring discharge at Expedition Fiord, Canadian High Arctic: Assessing conditional constraints for natural crystal growth // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2001. V. 65. P. 1429–1437. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00620-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00620-7).
- 5) Крылов А.А., Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Прасолов Э.М., Сапега В.Ф., Демидова А.Л., Парамонова М.С., Чудакова Д.В. Икаит (CaCO₃•6H₂O) в донных отложениях моря Лаптевых и роль анаэробного окисления метана в процессе его формирования // *ЗРМО. 2015. № 4. С. 61–75.*
- 6) Леин А.Ю., Миллер Ю.М., Намсараев Б.Б., Павлова Г.А., Пименов Н.В., Русанов И.И., Саввичев А.С., Иванов М.В. Биогеохимические процессы цикла серы на ранних стадиях диагенеза осадков на профиле река Енисей – Карское море // *Океанология. 1994. Т. 34, № 5. С. 681–692.*

ОСОБЕННОСТИ НАКОПЛЕНИЯ РТУТИ В ДОННЫХ ОСАДКАХ ВОСТОЧНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 200 ЛЕТ

Ким Д.В., Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С., Иванов М.В., Алаторцев А.В.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: ртуть, Арктика, скорости осадконакопления, геохимический фон, донные осадки.

Ртуть является нейротоксичным загрязнителем, распространяющимся по всему миру через атмосферный перенос, океанские течения и реки. Поступление ртути в арктические экосистемы в значительной степени обусловлено глобальными выбросами ртути, поскольку локальные антропогенные выбросы ртути в Арктике незначительны. Быстрые климатические изменения наиболее чутко проявляются в арктическом регионе. При таянии вечной мерзлоты возможно дополнительное поступление ртути в арктические морские экосистемы [1]. Обширные области восточной Сибири заняты вечной мерзлотой, которая в настоящее время деградирует и тем самым талый материал может выноситься в акваторию шельфа. В отсутствие прямых наблюдений оценку динамики поступления ртути возможно провести лишь по донным отложениям.

Ненарушенные керны донных отложений взяты коробчатым дночерпателем и многотрубным пробоотборником в рейсе №95 на НИС «Академик М.А. Лаврентьев». Пробы замораживались и в лабораторных условиях сушились в лиофильной сушилке. Затем пробы гомогенизировались и истирались в агатовой ступке. Определение ртути проводилось на атомно-абсорбционном спектрометре РА-915М с пиролитической приставкой ПИРО-915+. Определение химического состава проводилось на рентгенфлуоресцентном спектрометре Delta DPO 2000 Olympus. Органический углерод (total organic carbon – ТОС) определялся на анализаторе углерода Shimadzu ТОС-LCSH/СРН с приставкой для твердых образцов SSM-5000А. Точность определения контролировалась международными стандартами донных отложений HISS-1, MESS-4, PACS-3. Гранулометрический состав анализировался на лазерном дифрактометре Analysette 22 NanoTec Plus. Для расчета современных скоростей осадконакопления использовались данные по неравновесному свинцу-210 по модели постоянной начальной концентрации, так как его распределение в толще отложений стремиться к экспоненциальному закону.

Исследуемые керны донных отложений сложены в основном алеврито-пелитовыми частицами, доля песка увеличивается в отложениях, распространенных на внутреннем шельфе в зонах влияния крупных рек (Лена, Индигирка, Колыма). Окисленный слой (от коричневого до светло-коричневого) залегает в поверхностных горизонтах мощностью от первых сантиметров на внутреннем шельфе и до 30-50 сантиметров на внешнем шельфе и склоне. Доля биогенных компонентов (диатомовые, радиолярии, спикулы губок) возрастает в донных отложениях Чукотского моря. Современные скорости осадконакопления на внутреннем шельфе составляют 0,15-0,20 см/год, на внешнем шельфе и глубоководных частях уменьшаются до 0,02-0,05 см/год [2, 3].

В распределение ртути наблюдается тренд увеличения концентраций ртути в донных отложениях от внутреннего (глубина менее 50 м) шельфа к склону. Фоновые концентрации ртути в донных отложениях внутреннего шельфа изучаемых морей находится на уровне 20-32 мкг/кг. Исключение составляют донные отложения внутреннего шельфа юго-восточной части моря Лаптевых, концентрации ртути в которых составляют 38-39 мкг/кг. Донные отложения внешнего шельфа (от 50 до 200 м) характеризуется повышенным уровнем ртути с концентрациями 40-56 мкг/кг, при этом максимальная концентрация 66 мкг/кг обнаружена в Восточно-Сибирском море. Глубоководные отложения опробованы на слонах моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря, где концентрации ртути составили 32-34 мкг/кг и 41-50 мкг/кг соответственно.

Распределение ртути в толще донных осадков имеет тренд на увеличение её концентраций к поверхности дна. При сопоставлении со скоростями осадконакопления наблюдается рост накопления ртути в последние годы. При этом уровень концентраций ртути различен и зависит от литолого-фациальных условий седиментации и геоэкологической ситуации. Повсеместное увеличение накопления ртути в современный период, вероятно, связано с климатическими изменениями и антропогенным воздействием. Таяние вечной мерзлоты и сокращение ледового щита приводит с одной стороны к дополнительному поступлению ртути с речным стоком и плоскостным смывом эродированных пород и почв, с другой стороны освобождаются пространства для атмосферного осаждения на поверхность арктических морей. Под действием трансграничного переноса, обогащенные ртутью воздушные массы поступают из промышленно развитых районов восточной Азии в Арктику. В дальнейшем ртуть осаждается на поверхность моря и льда и, в конечном итоге, захоранивается в донных отложениях.

По результатам статистического анализа выделяются значимые положительные корреляции с органическим углеродом, марганцем, железом, свинцом, цинком и значимые отрицательные с кремнием, цирконием, стронцием как в поверхностном слое, так в толще донных отложений (до 50 см).

Проведенные исследования показали рост накопления ртути в донных отложениях современного (индустриального) периода. Уровень фоновых концентраций и поверхностного слоя зависит от литолого-фациальных условий осадконакопления. При этом для внутреннего шельфа, на который предполагается большее антропогенное влияние в будущем, фоновые концентрации ртути имеет малую изменчивость и находятся на уровне 20-30 мкг/кг.

Исследование выполнено за счет государственной темы № 121021700342-9

Список литературы

- 1) Schuster P.F. et al. Permafrost Stores a Globally Significant Amount of Mercury // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45. № 3. P. 1463–1471.
- 2) Астахов А.С., и др. Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков восточносибирского шельфа // *Геохимия.* 2021. Т. 66. № 6. С. 526–540.
- 3) Вологина Е.Г., и др. Вещественный состав позднеголоценовых отложений южной части Чукотского моря // *Океанология.* 2023. Т. 63. № 1. С. 84–94.

ПЛАТФОРМА IASRAAS КАК ОСНОВНОЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ.

Кислов М. В.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Ключевые слова: облачная платформа, интеллектуальные сервисы, информационные системы.

Для решения задачи непрерывного отслеживания катастрофических событий с помощью данных лазерного деформографа необходимо создать соответствующее программное обеспечение. Основой этой программы будет платформа IASRaas, созданная в 2011 году в ИАПУ ДВО РАН [1]. Она предназначена для создания оболочек интеллектуальных сервисов с помощью различных технологий. Платформу уже используют в различных сферах исследований, и сейчас в основном в медицинской отрасли [2]. Особенностью IASRaas является возможность отдельной проработки каждого элемента платформы (база знаний, решатель задач и интерфейс пользователя). Набор информационных ресурсов (онтологии, знания и данные) имеет единое представление.

Ещё одной особенностью данной платформы является наличие большого количества информации по её использованию на основном сайте [3] Сотрудниками ИАПУ ДВО РАН были описаны основные возможности платформы, а также размещены примеры использования данного программного продукта.

Основные этапы работы подсистемы будут такими:

- лазерный деформограф собирает данные;
- передаёт на сервера платформы IASRaas;
- программный компонент «Решатель задач» сравнивает полученные данные с уже имеющимися шаблонами в базе знаний;
- на вывод пользователю подаётся отчёт с результатами.

Для разработки платформы будет использован специализированный подход. Он позволит создать подсистему конкретно под поставленную задачу. Создание специализированных мульти-агентных сервисов подразделяется на следующие этапы:

- занесение данных информационных ресурсов для обработки (онтологии, базы знаний);
- создание решателя задач;
- разработка шаблонов сообщений;
- разработка интерфейса для пользователя;
- сборка интеллектуального сервиса из компонентов.

Занесение данных информационного ресурса — это создание онтологии и заполнение базы знаний платформы. Из этих данных будут собраны шаблоны, по которым подсистема будет анализировать поступающую информацию. После идёт создание основного механизма для сравнения данных в платформе – решателя задач. Сравнение происходит следующим образом: поступающие данные представляются в виде графа, основными параметрами которого являются амплитуда и частота; решатель сравнивает их с шаблоном из базы знаний; если совпадение обнаружено, выдает результат в форме отчёта пользователю; если совпадения не обнаружено, система попросит пользователя добавить данные в базу знаний.

На последнем этапе разрабатывается интерфейс для пользователей подсистемы. Они будут зарегистрированы через администратора платформы IASRaas. Таким образом у каждого пользователя будет доступ только к своим материалам. Доступ к материалам других пользователей

возможен только с их разрешения.

Подсистему можно использовать и в других задачах. В океанологии существуют различные направления, в которых необходима обработка большого количества данных в режиме реального времени. При этом акустическая океанография — это узкоспециализированная область физики. Следовательно, необходимо создавать уникальные модели для каждого проекта.

Разрабатываемая подсистема автоматизирует работу с данными измерений лазерного деформографа. Также обеспечит эффективное хранение данных последующих экспериментов. Оптимизирует процесс обработки и описания результатов.

№ 22-17-00121 "Возникновение, развитие и трансформация геосферных процессов инфразвукового диапазона"

Список литературы

- 1) Грибова В. В., Клещев А. С., Москаленко Ф. М., Тимченко В. А., Федорищев Л. А., Шалфеева Е. А. Облачная платформа IASaaS для разработки оболочек интеллектуальных сервисов: состояние и перспективы развития [Электронный ресурс]. / В. Грибова. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35560829>
- 2) Громашева О. С., Кислов М. В. Платформа IASaaS и возможности её применения в сфере акусто-геофизических исследований. [Электронный ресурс]. / М. Кислов. – Режим доступа: https://msun.ru/upload/csi_mni/mni70-1.pdf
- 3) Основной сайт платформы IASaaS. [Электронный ресурс]. / ИАПУ ДВО РАН. – Режим доступа: <https://iaspaas.dvo.ru/>

НАХОДКА ВИВИАНИТА В ДОННЫХ ОСАДКАХ КАРСКОГО МОРЯ

Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Кравчишина М.Д., Дара О.М., Филиппов А.С., Новичкова Е.А., Сломнюк С.В., Лозинская Л.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Вивианит, фосфаты, донные отложения, Арктические моря, Карское море, аутигенные минералы, диагенез, минералогия, геохимия.

Авторами впервые описаны находки вивианитовых агрегатов в донных осадках Карского моря. Вивианит – минерал из класса фосфатов, водный фосфат железа $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. В морских отложениях вивианит кристаллизуется в восстановительных условиях, где поровые воды осадков обеднены сульфидами и, наоборот, обогащены Fe^{2+} и PO_4^{3-} [1, 2]. Вивианитовые образования встречаются редко в арктических морях. Ближайшие из известных находок вивианита в осадках арктических морей описаны для юго-западного шельфа Шпицбергена [2], северной части Баренцева моря [3] и внешнего шельфа моря Лаптевых [4, 5].

В работе представлены первые результаты изучения морфологии и состава вивианитовых образований в донных отложениях, отобранных в юго-западной части Карского моря, проведен комплекс минералогических исследований. На основании полученных результатов высказано предположение об условиях его происхождения.

Колонка донных осадков была получена в ходе 89-го рейса (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2022 г. [6]. Отбор колонки был выполнен в юго-западной части Карского моря (ст. 7444; координаты: $72^\circ 25.823'$ с.ш. и $63^\circ 31.000'$ в.д.) с глубины 228 м при помощи ударной трубки большого диаметра. Длина колонки составила 619 см. Литологическое описание осадков и выделение литологических типов были выполнены по методикам, принятым в ИО РАН. При изучении минерального состава по всей мощности колонки были обнаружены и отобраны вивианитовые агрегаты [6]. Вивианитовые агрегаты были изучены методом оптической микроскопии, рентгеновской дифрактометрии (РД), методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) с сопутствующей энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (ЭДС). Архивная ненарушенная часть колонки была изучена с помощью автоматизированной системы комплексного исследования кернов (MSCL-XYZ GEOTEK).

В результате литологических исследований установлено, что вскрытая колонкой осадочная толща мощностью 619 см представлена однородными голоценовыми пелитовыми илами темно-серого цвета с многочисленными включениями гидротроилита. Мощность окисленного слоя не превышала 11 см [6].

При изучении минерального состава осадка (во фракции больше 63 мкм) при помощи стереомикроскопа по всей мощности восстановленных осадков колонки были обнаружены вивианитовые агрегаты различной морфологии, размера и цвета [6]. По результатам РД метода установлено, что по своему минеральному составу агрегаты представлены вивианитом.

В процессе микроскопических исследований было установлено три морфологических типа вивианитовых образований: 1) микроконкреции, 2) кристаллические агрегаты и 3) трубкообразные агрегаты (трубки) [6].

Важно отметить, что цвет вивианита по длине колонки изменяется от светло-голубого и синего (у кристаллических агрегатов вивианита) и от синего и сине-черного (у микроконкреций вивианита) в верхней части колонки до зеленого (кристаллические агрегаты вивианита и микроконкреции вивианита) в нижней части колонки. Синий цвет является характерным результатом окисления фосфатов из группы вивианита [1]. Так, цвет вивианита может отражать последовательность окислительно-восстановительных (редокс) процессов раннего диагенеза.

Результаты химического состава микроконкреций, кристаллических агрегатов и трубкообразных образований вивианита, полученные с помощью ЭДС, показали, что минеральное вещество, которым они сложены, соответствуют стехиометрической формуле этого минерала [6].

В морских условиях вивианит образуется в ходе раннего диагенеза осадков в бескислородных условиях. Изученные вивианитовые образования различных морфологических типов, по мнению авторов, представляют собой аутигенные образования.

Исследователи, обнаружившие и изучавшие вивианит в море Лаптевых [5], предположили, что наличие микроконкреций вивианита связано с усилением стратификации водной толщи, вызванной опреснением поверхностного слоя моря и образованием толстого ледяного покрова на протяжении большей части года. Опреснение было в значительной степени обусловлено поступлением талой воды с покровных ледников, а образование конкреций вивианита может отражать климатические события, связанные с поступлением талой ледниковой воды.

Таким образом, авторами представлены первые данные о морфологии, микроструктуре и химическом составе аутигенного вивианита в восстановленных осадках Карского моря. Выделено три морфологических типа вивианита, отражающие особенности аутигенного минералообразования, а также последующие вторичные изменения.

Находка вивианита является одной из немногочисленных обнаружений вивианита в отложениях арктического шельфа, требующая дальнейших детальных исследований. Исследование процессов образования вивианита в Карском море важно для реконструкции региональных палеоокеанологических событий в голоцене, связанных с исчезновением ледниковых покровов и поступлением пресной воды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0020. Часть минералогических и химических исследований осадков колонки выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00157-II, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/>.

Список литературы

- 1) Dijkstra, N., Slomp, C., Behrends, T., and Expedition 347 Scientists: Vivianite is a key sink for phosphorus in sediments of the Landsort Deep, an intermittently anoxic deep basin in the Baltic Sea, *Chem. Geol.*, 438, 58–72, 2016.
- 2) Łącka M., Michalska D., Pawłowska J., et al. Multiproxy paleoceanographic study from the western Barents Sea reveals dramatic Younger Dryas onset followed by oscillatory warming trend // *Scientific Reports*, 2020.10(1).
- 3) Мурдмаа И.О., Овсепян Е.А., Иванова Е.В., Якимова К.С. Гранулированный вивианит в проливе Кембридж, Земля Франца Иосифа (Баренцево море) // *Литология и полезные ископаемые*. 2023. №4. С. 359-364.
- 4) Logvina E., Krylov A., Taldenkova E. et al. Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe–Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic) // *Arktos*. 2018. V. 4. P. 1–13.
- 5) Taldenkova E, Nikolaev S, Bauch HA, et al. History of ice-rafting and water mass evolution at the Northern Siberian Continental Margin (Laptev Sea) during late glacial and Holocene times // *Quat Sci Rev* 2010. V. 29(27–28). P. 3919–3935.
- 6) Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Кравчишина М.Д. и др. *Океанология*. 2024. (в печати).

ТИПИЧНОЕ И НЕТИПИЧНОЕ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВОЕ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЕ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Колесник О.Н.¹, Карабцов А.А.², Съедин В.Т.¹, Колесник А.Н.¹, Терехов Е.П.¹

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: железомарганцевое минералообразование, Японское море.

Железомарганцевые образования (ЖМО) океанов и морей становятся объектом все более пристального внимания геологов. ЖМО содержат целый ряд ценных металлов (Mn, Cu, Ni, Co и др.) и рассматриваются в качестве руд, промышленная добыча которых может начаться в обозримом будущем. Соответственно, возникает необходимость во всестороннем изучении ЖМО и постоянной систематизации данных.

По результатам тематических исследований 1970–2020-х гг. [1], для Японского моря характерны низкотемпературные гидротермальные корки, сложенные тодорокитом и бернесситом. Мощность корок – от нескольких миллиметров до 25 см. Они имеют преимущественно слоистое строение и развиты в привершинных частях вулканических построек глубоководных котловин (наиболее продуктивный интервал глубин – 1500–2500 м). В химическом составе наблюдается обогащение марганцем и барием, обеднение железом – большинством микроэлементов. Среднее содержание марганца в ЖМО российской части Японского моря составляет 36 %, железа – 5.5 %, бария – до 3 %, суммарное содержание никеля, меди и кобальта – 1036 г/т [2]. Корки демонстрируют отрицательные значения цериевой аномалии ($Se_{an} < 1$) и положительные – европиевой ($Eu_{an} > 1$). Согласно единичным биостратиграфическим определениям, возраст корок оценивается как позднеплейстоценовый. Соответственно, они росли достаточно быстро, скорость их роста могла достигать нескольких миллиметров в тысячу лет. Не исключено, что в периоды затухания гидротермальной деятельности рост происходил гораздо медленнее за счет гидрогенной поставки вещества.

С 2015 г. вышла серия научных работ с описанием нетипичных для Японского моря пирролюзитовых, манганитовых, гетитовых корок [3–6]. Формирование массивного пирролюзита на безымянной возвышенности в Центральной котловине Японского моря (станция LV58-4) предположительно связано с обычной для Японского моря гидротермальной деятельностью в совокупности с гидрохимическими особенностями района (повышенное содержание растворенного кислорода в морской воде на глубине более 3000 м) [3]. Манганитовые корки хребта Южное Ямато с примесью пирохроита и кварца (станция 1411) – это низкотемпературные гидротермальные образования, сформировавшиеся, судя по всему, в условиях относительного недостатка кислорода на глубине не более 1300 м [4]. Гетит на возвышенности Криштофовича (станция 1635) кристаллизовался на глубине 1300–1350 при вероятной близости к выходящей на поверхность дна гидротерме [5]. В корках возвышенности Криштофовича отмечается высокое содержание редкоземельных элементов до 862 г/т и тория до 14 г/т, значения $Se_{an} > 1$ и $Eu_{an} < 1$, что указывает на гидротермально-осадочный генезис. Брекчиевые корки хребта Северное Ямато, сложенные гетитом с прожилками кварца (станция 1410), являются гидротермальными и формировались на глубине 1000–1100 м в пределах тектонически-активного участка дна [6].

За счет выявления нетипичных для Японского моря случаев железомарганцевой минерализации расширен диапазон региональных вариаций вещественного состава ЖМО и условий их формирования.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00004, <https://rscf.ru/project/23-27-00004/>.

Список литературы

- 1) Астахова Н.В. Гидротермальный рудогенез Японского моря // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 9. С. 1191–1203. DOI: 10.15372/GiG2020153.
- 2) Астахова Н.В., Лопатников Е.А. Марганцевые руды Японского моря (экономическая зона России) // Природа. 2017. № 12. С. 45–51.
- 3) Астахова Н.В., Съедин В.Т., Можеровский А.В., Лопатников Е.А. Первая находка массивного пиролюзита в глубоководной котловине Японского моря // ДАН. 2015. Т. 462, № 1. С. 68–72. DOI: 10.7868/S0869565215130150.
- 4) Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т., Колесник А.Н., Терехов Е.П. Первая находка манганитовых корок в Японском море // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511, № 2. С. 191–197. DOI: 10.31857/S2686739723600212.
- 5) Колесник О.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т., Колесник А.Н. Первая находка гетитовых корок в Японском море // ДАН. Науки о Земле. 2022. Т. 505, № 2. С. 159–164. DOI: 10.31857/S2686739722080102.
- 6) Kolesnik O.N., Karabtsov A.A., S'edin V.T., Kolesnik A.N., Terekhov E.P. A New Atypical Case of Ferromanganese Mineralization in the Sea of Japan // Doklady Earth Sciences. 2024. DOI: 10.1134/S1028334X23603668.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАЛИНОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ КОЛОНКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ОХОТСКОГО МОРЯ

Костромина Н.А.^{1,2}, Яржембовский Я.Д.¹, Гусев Е.А.¹, Усов А.Н.¹

¹ФГБУ "ВНИИОкеангеология", г. Санкт-Петербург, Россия

²СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Ключевые слова: палинология, донные отложения, голоцен, Сахалин, Охотское море.

Изучение донных отложений Охотского моря в его западной части к Востоку от острова Сахалин (мыс Терпения – поселок Ноглики) проходило в рамках работ по геологическому картированию. Экспедиционные работы проводились летом 2022 года, пробоотбор осуществлялся с помощью грунтовой прямооточной трубки и ковша.

Колонка донных осадков ПМО-2212-Т мощностью 296 см была отобрана с глубины 197 м. Осадки представляют собой алевропелиты с небольшой примесью песка, цвет которых постепенно переходит от оливкового (в верхней части колонки) к серому. В интервале глубин 102-195 см встречаются полурастворенные раковины моллюсков и их обломки (до глубины 135 единично, ниже чаще), в интервале 145-190 – гальки (до крупных) и мелкий щебень. В нижней части колонки в однородных, серых, массивных алевропелитах обнаружен глендонит. Обработка проб проводилась в лаборатории «Геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана» Института наук о Земле СПбГУ. Обработка проб проводилась с применением плавиковой кислоты (HF), для расчета абсолютной концентрации пыльцевых зерен при лабораторной подготовке были добавлены таблетки *Lycopodium*. Спорово-пыльцевой анализ колонки завершен в декабре 2023 года. Было изучено 52 пробы. Выделено 63 пыльцевых и 12 споровых таксонов. В спорово-пыльцевых спектрах доминирует пыльца древесных таксонов (*Betula Albae*, *Pinus s/g Haploxyylon*, *Picea*), в группе трав доминирует пыльца осоковых, этот таксон является субдоминантой. Для интерпретации полученных данных и их сравнения с ранее опубликованными материалами в программе Tilia была построена спорово-пыльцевая диаграмма. На диаграмме выделяются 4 палинозоны.

Палинозона 1 (296-135 см). Доминирует пыльца древесных таксонов (45-55%). В группе преобладает пыльца березы (*Betula Albae*), подчиненную роль играют таксоны: *Pinus*, *Alnus*, *Salix*. Отмечается присутствие пыльцы теплолюбивых таксонов (*Ulmus*, *Carpinus*, *Pterocarya*). Значительную роль играют таксоны группы трав (40-35%), главным образом пыльца *Cyperaceae*, присутствует пыльца ксерофитов (*Artemisia*, *Chenopodiaceae*). Концентрация пыльцы от 1000 до 2000 пыльцевых зерен на мг осадка.

Палинозона 2 (135-71 см). Выделяется по увеличению доли древесных (55-65%) и кустарниковых таксонов (до 20%), а также по исчезновению пыльцы *Carpinus*, *Pterocarya*. Отмечаются максимальные концентрации пыльцевых зерен (1500 – 3000 пыльцевых зерен на мг осадка).

Палинозона 3 (71-30 см). Происходит значительное изменение состава спорово-пыльцевых спектров. Доля пыльцы древесных таксонов возрастает до 70%. В группе древесных изменяются доминантные таксоны. Преобладает пыльца *Pinus s/g Haploxyylon*, субдоминантами являются *Picea* и *Betula Albae*. Отмечается присутствие пыльцы теплолюбивых растений (*Quercus*, *Ulmus*, *Cypresseaceae*). Концентрация составляет 700-1000 пыльцевых зерен на мг осадка.

Палинозона 4 (30-0 см). Выделяется по появлению пыльцы *Abias* (3-4%) и небольшому увеличению доли пыльцы *Betula Albae* (до 25%). Концентрация пыльцы увеличивается до 1200 зерен на мг осадка.

Полученные результаты были сопоставлены с ранее опубликованными материалами по разрезам Сахалина (торфяник Пензенский на юге [1], торфяник Оха на севере [2], отложения озера Пайно на северо-востоке [3] и разреза Хоэ на северо-западе [3,4]) и острова Хокайдо (торфяник у

озера Барасантоу [5]). Помимо этого, рассматривались палеогеографические реконструкции природной среды и уровня моря [6].

Развитие березовых редколесий в период осадконакопления нижней части колонки. Данная растительность может свидетельствовать об условиях более суровых, чем современные. Присутствие пыльцы теплолюбивых растений может быть связано с ее переносом из более южных ареалов (как воздушным, так и водным путем), что в свою очередь может быть сопоставлено с низким уровнем моря в конце позднего плейстоцена – начале голоцена [6] и с полным или частичным осушением пролива Лаперуза.

Берёзовые редколесья постепенно сменяются березовыми лесами. Доминирование березы отмечается в спорово-пыльцевых спектрах разрезов севера Сахалина [2,3] в конце раннего голоцена и в среднем голоцене. На юге острова в растительном покрове отмечается большая доля пыльцы хвойных [1]. Лучшая корреляция данных с северными разрезами может свидетельствовать о смене преобладающего направления переноса пыльцевых зерен на северное.

Развитие елово-березово-сосновых лесов, которые произрастают на территории центрального Сахалина до настоящего времени. Резкое увеличение доли хвойных пород в растительном покрове надежно зафиксировано в разрезах на юге Сахалина и острове Хокайдо в начале позднего голоцена [1,6]. Присутствие пыльцы пихты в верхних горизонтах осадков может свидетельствовать о потеплении климата, относительно более нижних частей.

Исследование выполнено в рамках работ по объекту Государственного задания ВНИИОкеан-геология «Создание комплекта Государственной геологической карты масштаба 1:1000 000 листа М-55 (Мыс Терпения)»

Список литературы

- 1) Гвоздева И.Г., Микишин Ю.А. Стратиграфия и палеогеография голоцена юго-западного Сахалина // Естественные и технические науки, 2008, № 3, с. 177–183.
- 2) Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. Средний-поздний голоцен Северо-сахалинской равнины // Russian journal of Earth Sciences, 2013, № 2 (14), с. 97–108.
- 3) Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г. Ранний – Средний голоцен северного Сахалина // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН, 2021, № 1, с. 50–65.
- 4) Igarashi Y., Zharov A. Climate and vegetation change during the late Pleistocene and early Holocene in Sakhalin and Hokkaido, northeast Asia // Quaternary International, 2011, V 237, 24-31 pp.
- 5) Fujiki T., Wada K., Sato E., Okuno M. Vegetation history and the impact of tephra deposition during 7000 years based on pollen and tephra analysis of a Barasantou Bog sediment core, eastern Hokkaido, northern Japan // Quaternary International, 2019, V 503, 24-31 pp.
- 6) Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г., Петренко Т.И. Ранний голоцен Сахалина // Actual Problems of Humanitarian and Natural Sciences, 2010, № 12, с. 432–437

МОДЕЛЬ ЗОН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ЛАПТЕВОМОРСКОГО РЕГИОНА

Крылов А.А., Либина Н.В., Ковачев С.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: землетрясение, сейсмичность, оценка сейсмической опасности, зоны ВОЗ, море Лаптевых, активные разломы, цифровая модель рельефа, геоморфометрический анализ, поле силы тяжести

Шельф и континентальный склон моря Лаптевых является наиболее сейсмоактивным районом среди акваторий всех арктических морей, что определяется их расположением на сочленении с подводным хребтом Гаккеля. Это определяет необходимость тщательной оценки сейсмической опасности региона при возведении и эксплуатации объектов жилой, промышленной и транспортной инфраструктуры.

Первая попытка тектонико-сейсмического районирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана была предпринята еще в начале 70-х годов [1]. Позднее специально для акватории моря Лаптевых была предложена конфигурация основных сейсмических зон и схема сейсмического районирования [2].

Во время работы над комплектом карт общего сейсмического районирования ОСР-97, ставших впоследствии нормативными, была разработана линеаментно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель для всей Северной Евразии, включая, разумеется, и Лаптевоморский регион [3]. Впоследствии, эта модель неоднократно уточнялась и дополнялась при создании последующих поколений карт ОСР. Пояснительная записка к нормативным в настоящее время картам ОСР-2016 содержит информацию о пространственном распределении площадных и линейных зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) и приуроченной к ним максимально возможной магнитуде M_{max} , однако остальные более детальные параметры не опубликованы. Еще одна альтернативная конфигурация зон ВОЗ для всего Арктического региона приведена в работе [4].

В рамках настоящей работы была разработана уточненная модель зон ВОЗ Лаптевоморского региона, основанная на результатах геоморфометрического анализа цифровой модели рельефа (ЦМР) и аномального поля силы тяжести в редукции Буге. В качестве исходных данных использовался фрагмент ЦМР ИВСаО v.4.2 [5] для дна моря Лаптевых и прилегающей материковой зоны. Шаг дискретизации сетки 5 км соответствует задаче выделения линеаментов регионального уровня.

Выделение линеаментов регионального масштаба не требует ЦМР высокой детальности. ЦМР ИВСаО перед применением была сглажена низкочастотной фильтрацией. Фильтры низких частот (ФНЧ) сглаживают локальные отклонения рельефа и артефакты, связанные с тем, что ЦМР дна сформирована на основе данных из различных источников. Разные участки ЦМР проявляются как обладающие различной пространственной частотой: высокочастотная – береговая зона, низкочастотная – глубоководная. Расчеты для этих участков проводились независимо друг от друга.

Для выделения разломов на ЦМР были применены методы морфометрического анализа рельефа: теневой анализ и выделение килевых форм через расчет кривизны рельефа дна. Теневой анализ морфологии дна выполнялся визуальным путем по полутоновым изображениям (теневым картам) ЦМР с его условной подсветкой при разных азимутах и углах виртуального источника света. Выделение килевых форм рельефа дна по картам геоморфометрических характеристик проводилось после расчета профильной (вертикальной) и плановой (горизонтальной) кривизны.

Поскольку разломам соответствуют границы изменения параметров геофизических полей, помимо ЦМР была использована модель аномального поля силы тяжести в редукции Буге для исследуемого района. В качестве исходных данных выбрана глобальная модель WGM2012 [6].

Как и для ЦМР, характеристики кривизны поля были рассчитаны для модели аномального поля силы тяжести, что позволило выделить градиентные линии изменения параметров поля от минимального к максимальному по которым и выделялись линии линеаментов предположительно соответствующие неотектоническим нарушениям.

Далее была составлена сводная карта линеаментов, выделенных по рельефу, гравитационному полю и в результате анализа доступной литературы. На сводную карту также были добавлены эпицентры землетрясений из сводного каталога. На основе сводной карты были выбраны наиболее достоверные линеаменты, а также выделены площадные зоны ВОЗ. Для полученных линейных и площадных зон ВОЗ были построены графики повторяемости землетрясений и найдены их характеристики, а также другие необходимые параметры.

Полученные результаты, предназначены, в основном, для подготовки входных данных для проведения расчетов в рамках вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО). Модели зон ВОЗ также используются при оценке сейсмогенной цунамиопасности детерминистским и вероятностным методами.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-17-00125.

Список литературы

- 1) Аветисов Г.П., Голубков В.С. Тектоно-сейсмическое районирование Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана и сопредельных акваторий. Геология и полезные ископаемые севера Сибирской платформы. Л.: изд-во НИИГА. 1971. С. 66-73.
- 2) Кузин И.П. Обзорное сейсмическое районирование шельфов северных окраинных морей СССР (на примере моря Лаптевых). Морская сейсмология и сейсмометрия. М.: Ин-т океанологии, Москва. 1989. 150 с.
- 3) Ulomov V.I. Seismic hazard of Northern Eurasia // *Annali di Geofisica* V. 42. № 6. 1999. P. 1023-1038.
- 4) Аветисов Г.П., Зинченко А.Г., Мусатов Е.Е., Пискарев А.Л. Сейсмическое районирование Арктического региона. Российская Арктика: геологическая история, минерагения, геоэкология. СПб.: изд-во ВНИИОГ. 2002. С.162-175.
- 5) Jakobsson M. et al. The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0 // *Geophysical Research Letters* V. 39. 2012. L12609. P. 1–6.
- 6) Bonvalot, S., Balmino, G., Briais, A., M. Kuhn, Peyrefitte, A., Vales N., Biancale, R., Gabalda, G., Reinquin, F., Sarrailh, M., 2012. Commission for the Geological Map of the World. BGI-CGMW-CNES-IRD, Paris.

ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ БЕРИНГОВА МОРЯ ПОСЛЕДНИХ 23 ТЫСЯЧ ЛЕТ НА ОСНОВЕ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА

Кузьмина В.А.¹, Артемова А.В.¹, Лю Я.²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

² Ключевая лаборатория морской седиментологии и геологии окружающей среды, Первый институт океанографии, Министерство природных ресурсов КНР, г. Циндао, КНР

Ключевые слова: Берингово море, диатомовые водоросли, продуктивность, поздний плейстоцен, голоцен, диатомовый анализ.

Для более детального понимания климатических событий, происходящих в прошлом, помимо систематизации и верификации уже полученных палеоокеанологических данных, нужны более подробные исследования для прогноза климата в ближайшем будущем.

В геологической истории происходили разномасштабные по времени палеоокеанологические изменения, связанные с колебанием уровня моря, с изменением течений, солёности, продолжительностью и миграцией льда, ростом ледников, связанные со значительными изменениями климата.

Особую роль в изучении природных процессов, которые меняются при изменении климата, играют исследования глубоководных морских осадков, которые по сравнению с континентальными менее подвержены нарушениям при седиментации и позволяют проследить очередность климатических обстановок и природных процессов [1].

Один из методов исследования осадков – анализ диатомовых водорослей в их составе. Диатомовые водоросли являются одноклеточным микрофитопланктоном с кремнеземным панцирем, который хорошо сохраняется. Изучение экологических предпочтений разных видов диатомей позволяет восстанавливать природные условия, существовавшие при осадконакоплении [3].

Есть моря, в осадках которых диатомовые водоросли захоронены насыщеннее, чем в других, что связано с высокой биопродуктивностью этих акваторий и подходящими для диатомей гидрологическими условиями. Это и определяет ведущую роль диатомей в изучении палеообстановок таких регионов, например дальневосточных морей.

Для восстановления палеоокеанологических обстановок и палеопродуктивности в дальневосточных морях нами был проведен диатомовый анализ осадков Берингова моря. Материалом для изучения послужила колонка глубоководных осадков ARC B11 из Берингова моря. Колонка была получена с глубины 1530 м. Длина керна 610 см. Абсолютная возрастная модель построена Лю Я. на основе радиоуглеродных датировок [6].

Определение видов и подсчёт количества створок проводился с использованием микроскопа Микмед-6, при увеличении x400 – x1200. Для более объективной интерпретации, данные диатомового анализа сопоставлялись с результатами геохимических анализов. После сопоставления собственных данных с результатами ранних исследований [2,4,5] была проведена реконструкция палеоклиматических обстановок последних 23 тыс. лет - окончания последнего оледенения, перехода к голоценовому потеплению.

Количественный и качественный подсчет диатомей в колонке ARC-B11 показал, что диатомовая флора отражает палеоокеанологические условия Берингова моря (потепление/похолодание, ледовый режим, продуктивность, закрытие/открытие Берингова пролива и колебания уровня моря) в течение плейстоцена-голоцена.

Палеоокеанологические и палеоклиматические условия Берингова моря восстанавливались на основе количественного содержания и экологических характеристик диатомовых водорослей, обнаруженных в осадках. За последнее 23 тыс. лет по полученным данным, мы можем выделить несколько периодов потепления и похолодания:

- Период последней фазы оледенения (с 23,16 по 14,7 тыс. лет назад). В этом периоде низкая продуктивность диатомей связана с неблагоприятными условиями для их жизнедеятельности и недостатком питательных веществ. Преобладают открыто-океанические холодноводные диатомеи. Доля ледовых видов высокая, что указывает на длительный зимний сезон, а также на низкие температуры. Регрессия моря и эрозия отложений отразились в высокой доле переотложенных видов.
- Период высокой продуктивности – потепление Бёллинг-Аллерёд (с 14,7 по 12,9 тыс. лет назад). На этот период приходится максимум содержания диатомовых водорослей. Рост численности тепловодных, открыто-океанических и пресноводных видов диатомей в этот период свидетельствует о потеплении климата и повышением уровня моря.
- Период похолодания позднего Дриаса (с 12,7 по 11,8 тыс. лет назад). Относительный спад численности диатомей отражает похолодание климата и уменьшение продуктивности поверхностных вод во время понижения температур.
- Голоцен (с 11,8 тыс. лет назад). Потепление климата повлияло на открытие Берингова пролива, на увеличение продуктивности диатомей, и на сокращение объемов льда. Видовой состав диатомей отражает близкие к современным параметры среды.

Исследования поддержаны грантом РНФ № 22-17-00118.

Список литературы

- 1) Горбаренко С.А.; Артемова А.В. Хроностратиграфия верхнечетвертичных осадков северо-западной Пацифики и Берингова моря, изменение среды и биопродуктивности. Тихоокеанская геология, 2003, том 22, № 5, с. 23–38
- 2) Жузе А.П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-западной части Тихого океана. М.: Изд-во Академии наук СССР. 1962. 259 с.
- 3) Стрельникова Н.И. Диатомовые водоросли и их использование в стратиграфических и палеогеографических исследованиях // Н.И. Стрельникова, А.Ю. Гладенков // Вопросы современной альгологии. 2019. № 2 (20). — 38 с
- 4) Caissie В.Е. Diatoms as Recorders of Sea Ice in the Bering and Chukchi Seas: Proxy Development and Application Dissertations, 2012.
- 5) Caissie В. Е., Warming the Arctic: the response of sea ice in the Bering sea to climate change past, present, and future - Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 26 с.
- 6) Sun Tenfey, Van Khunley, Chen Isin, Li Chaosin, Chzhu Aymey, Bay Yachzhi, Shi Syuefa, Gorbarenko Sergey, Bosin Aleksandr, Lyu Yanguan. Paleoproductivity changes in the northern Bering Slope over the last 23 ka and the response to the sea-ice evolution. // Haiyang Xuebao 40(5). 2018.С. 90-106.

КОРРЕЛЯЦИЯ ПАЛЕООКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В СУБАРКТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА И НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОМ БАССЕЙНЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 11 ТЫСЯЧ ЛЕТ

Кулешова Л.А.¹, Баширова Л.Д.^{1,2}, Дорохова Е.В.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

Ключевые слова: палеотемпературы, биопродуктивность, скорости придонных течений, фораминиферы, голоцен.

Вариации палеоокеанологических условий, зарегистрированные в высокоширотных районах Северной Атлантики в голоцене, вероятно, оказывали значительное влияние на глобальные климатические процессы через систему обратных связей [1, 2]. В настоящей работе проведена корреляция палеоокеанологических событий в субарктической области Атлантики и Норвежско-Гренландском регионе для последних 11 тысяч лет. С этой целью проанализированы данные исследования колонки АИ-3359 (59°29.885' с.ш. 24°42.105' з.д., 2517 м, длина 500 см), отобранной к востоку от хребта Рейкьянес, на дрефте Гардар, а также опубликованные сведения высокого разрешения по 10 другим колонкам донных осадков. Компиляция и анализ графиков распределения поверхностных температур и солености, изотопно-геохимических и микропалеонтологических индикаторов, а также гранулометрических данных позволили проследить историю изменений поверхностной и глубинной циркуляции вод в голоцене и передачу палеоклиматических сигналов между Норвежско-Гренландским бассейном и субарктической Атлантикой.

В раннем голоцене по гранулометрическим данным колонки АИ-3359 установлено, что придонная циркуляция характеризуется высокой вариабельностью скоростей течений с максимумом в интервале 9.8–9.3 тыс. кал.л.н. Температурные кривые высокого разрешения, реконструированные по концентрации алкенонов и содержанию диатомовых водорослей в донных осадках колонок из различных районов Северной Атлантики, демонстрируют сильную изменчивость, охватывая диапазон масштабов от десятилетних до вековых и тысячелетних. Большая амплитуда колебаний поверхностных температур, зарегистрированная близ северного побережья Исландии, вероятно, свидетельствует о попеременном влиянии на район теплой Северо-Исландской ветви течения Ирмингера и холодных арктических вод (колонки MD99-2275, MD99-2269) [1]. Аналогичная высокоамплитудная изменчивость поверхностных температур обнаружена в осадках Датского пролива и обусловлена, по мнению авторов [3, 4], различным вкладом теплых, соленых атлантических вод и холодных, более пресных арктических вод Восточно-Гренландского течения. В колонке P-013, отобранной южнее Гренландии, по сообществам динофлагеллят прослежены условия устойчивой поверхностной стратификации и выраженных сезонных контрастов биопродуктивности из-за присутствия айсбергов, которые откалывались от Гренландского ледникового щита, и выноса морского льда и талых вод из Северного Ледовитого океана [5]. Относительно высокие температуры (по концентрации алкенонов в донных осадках колонки MD95-2015) указывают на преобладающее влияние теплого Северо-Атлантического течения (САТ) над восточным флангом хребта Рейкьянес, несмотря на периодические вторжения холодных вод из Лабрадорского региона, например около 9.3 и 8.2 тыс. кал.л.н. [1]. О доминирующей доли САТ свидетельствуют также повышенные температуры, реконструированные по соотношению Mg/Ca в раковинах планктонных фораминифер в колонке RAPiD-12-1K [2], близкие к значениям в колонке АИ-3359. Несмотря на близость расположения колонок, температуры, полученные по палеоиндикаторам в разрезах RAPiD-12-1K и АИ-3359, оказываются несколько ниже значений по MD95-2015, что, скорее всего, связано с

различиями в экологических предпочтениях планктонных фораминифер и алкенон-продуцентов (глубина обитания, зависимость от времени года). К западу от хребта Рейкьянес более холодные, но закономерно увеличивающиеся температуры во второй половине раннего голоцена (колонка LO-09-14), отражают слабое, но постепенно усиливающееся влияние САТ на фоне доминирования арктических вод [6].

Синхронность роста температур близ северного побережья Исландии и над восточным флангом хребта Рейкьянес регистрируется в начале оптимума голоцена с разницей всего в 1.5 °С и косвенно отражает интенсификацию циркуляции теплых ветвей САТ в субполярные районы Атлантики. Этот интервал характеризуется постепенной интенсификацией придонной циркуляции, достигшей максимума 5.7 тыс. кал.л.н. Выраженное похолодание около 5.3 тыс. кал.л.н., известное как событие Бонда 4 и связанное с повышением количества дрейфующих льдов, также регистрируется в осадках вышеуказанных районов и к западу от хребта Рейкьянес. Данное событие привело к ослаблению Субполярного круговорота, Атлантической меридиональной циркуляции, сокращению интенсивности формирования глубинных вод и маркирует установление неогляциальных условий севернее Исландии.

Интервал последних 2.5 тыс. кал.л. знаменуется постепенным ростом поверхностного температурного контраста между северными морями и субарктической областью Атлантического океана, и в настоящее время разница температур составляет около 4.5 °С. В районе дрейфа Гардар этот интервал характеризуется стабильными скоростями придонных течений с тенденцией к увеличению в последнюю тысячу лет.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №22-17-00170, <https://rscf.ru/project/22-17-00170>.

Список литературы

- 1) Sicre M.A., Jalali B., Eiríksson J. et al. Trends and centennial-scale variability of surface water temperatures in the North Atlantic during the Holocene // *Quaternary Science Reviews*. 2021. V. 265. 107033.
- 2) Thornalley D.J.R., Elderfield H., McCave I.N. Holocene oscillations in temperature and salinity of the surface subpolar North Atlantic // *Nature*. 2009. V. 457. P. 711–714.
- 3) Jennings A., Andrews J., Wilson L. Holocene environmental evolution of the SE Greenland shelf north and south of Denmark Strait: Irminger and East Greenland Current interactions // *Quaternary Science Reviews*. 2011. V. 30. P. 980–998.
- 4) Justwan A., Koç N., Jennings A.E. Evolution of the Irminger and East Icelandic current systems through the Holocene, revealed by diatoms-based sea surface temperature reconstructions // *Quaternary Science Reviews*. 2008. V. 27. P. 1571–1582.
- 5) Solignac S., de Vernal A., Hillaire-Marcel C. Holocene sea-surface conditions in the North Atlantic – contrasted trends and regimes in the western and eastern sectors (Labrador Sea vs. Iceland Basin) // *Quaternary Science Review*. 2004. V. 23. P. 319–334.
- 6) Andersen C., Koç N., Moros M.A highly unstable Holocene climate in the subpolar North Atlantic: evidence from diatoms // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 2155–2166.

РЕКОНСТРУКЦИИ ГОЛОЦЕНОВОГО ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ПРИВЕРШИННОЙ ЧАСТИ ДЕЛЬТЫ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА

Лысенко Е.И.

Московский государственный университет, НИЛ новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, г. Москва

Ключевые слова: микропалеонтология, морская геология, дельтовые фацции.

За период голоцена дельта Волги подвергалась неоднократному затоплению водами Северного Каспия в ходе новокаспийской трансгрессии. По оценкам разных авторов, максимальная абсолютная высота береговой линии Каспия составляла от –20 м [1], что предполагает затопление практически всей территории современной дельты, до –24 м [2], что могло означать затопление нижней и (частично) центральной частей современной дельты.

Для оценки возможного влияния подъёма уровня моря на осадконакопление в привершинной части дельты в работе представлены результаты изучения материала из скважины Роу-2016 (пос. Пойменный, правобережье р. Рыча) комплексом методов: диатомовым, гранулометрическим и геохимическим. Абсолютная высота заложения скважины составила –21 м, глубина – 15 м.

Согласно полученным результатам, в привершинной части дельты (пос. Пойменный) толща преимущественно песчаных отложений формировалась в пресноводных условиях. Согласно фондовым материалам, в этом районе мощность голоценовых отложений, которые представлены в основном речным аллювием с линзами озёрных осадков, составляет более 20 м [3]. На основе этих данных весь интервал керна скв. Роу-2016 отнесён к голоценовому периоду.

По результатам диатомового анализа в разрезе скважины условно выделено 5 экостратиграфических зон по диатомеям. Отсутствие диатомей или крайне низкие их концентрации в исследованных отложениях, скорее всего, могли быть обусловлены высокими скоростями осадконакопления на данной территории. В общей сложности определено 90 таксонов. Диатомеи содержат пресноводные виды, известные из современных осадков дельты [4], и обломки створок морских видов, по видимому, переотложенных. В составе пресноводных диатомей преобладают планктонные виды *Aulacoseira granulata*, *A. ambigua* и бентосный *Amphora copulata*. Резкая смена таксономического состава наблюдается на глубине 1,4 м: преобладают бентосные виды родов *Epithemia* и *Eunotia*, являющиеся индикаторами застойных условий осадконакопления.

По результатам гранулометрического анализа в скважине выделено 5 групп образцов, характеризующих разную динамичность сред осадконакопления. В интервале 15,0-12,5 м (1 группа) преобладает смешанный состав частиц: по 25-30% приходится на фракции тонкозернистого и крупно-среднезернистого песков, 20% составляет мелкий алеврит, 15% – глина (максимальная доля по разрезу). Плохая сортировка материала может свидетельствовать о чередовании проточных и застойных условий. В интервале выявлены единичные створки пресноводных планктонных диатомей, что может являться признаком интенсивного осадконакопления в русле дельтовой протоки. Смешанный состав частиц в таком случае является результатом размывания речным аллювием более древних подстилающих пород (например, морских глин или отложений дельтовых ильменей).

На глубине 12,0-3,0 м (2 группа) материал отличается лучшей сортировкой, по сравнению с образцами из нижней части скважины, наблюдается бимодальное распределение частиц: содержание тонкозернистого песка в пределах 40-60%, мелкого алеврита – 20-30%, что может говорить о более длительном воздействии среды осадконакопления и наличии двух источников материала. В этой толще встречаются прослойки, характеризующие «переходные условия» (3 группа): при бимодальном распределении наблюдается худшая сортировка за счёт высокой доли крупно- и среднезернистого песка (около 20%), что говорит о более высокой интенсивности потока и дополнительном

источнике крупного материала. Также встречаются прослои, характеризующие «переходные условия» в сторону более спокойной гидродинамической среды (4 группа): в них преобладает мелкий алеврит (около 30%), доли крупного алеврита и тонкозернистого песка примерно равные (25-35% в разном соотношении), доля глин довольно высокая (10%). Плохая сортировка материала может свидетельствовать о чередовании проточных и застойных условий. По диатомеям выявлены култучные условия осадконакопления, соответствующие слабопроточному заливу в дельте с высокой интенсивностью испарения, что подтверждается геохимическими маркерами.

В интервале 2,7-1,0 м выявлена 5 группа образцов с бимодальным распределением частиц: доли крупного и мелкого алеврита составляют 35-40%, меньшая доля у среднего алеврита – 15%. Это описывает условия осадконакопления в спокойной гидродинамической обстановке. В верхних 2,7 м осадка существенных вариаций гранулометрического состава не выявлено, что говорит о длительном преобладании единообразной среды осадконакопления. Результаты геохимического и диатомового анализа, напротив, демонстрируют изменчивость по разрезу, что может говорить о преобладании локальных факторов в формировании осадка. По диатомеям выявлена смена условий от проточных к застойным обстановкам ильменя (озерообразного водоёма в дельте) и поля (водоёма на пойме, появляющегося во время половодья).

В результате работы выявлено несколько циклов осадконакопления с переходом от проточных условий дельтовых протоков до слабопроточных обстановок култука и застойных условий ильменя/поля.

Работа подготовлена в рамках госзадания географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (121051100135-0).

Список литературы

- 1) Варущенко С.И., Варущенко А.Н., Клиге Р.К. Изменения режима Каспийского моря и бессточных водоемов в палеовремени. М.: Наука, 1987. 240 с.
- 2) Нижняя Волга: геоморфология, палеогеография и русловая морфодинамика / Зайцев А.А., Иванов В.В., Коротаев В.Н., Лабутина И.А., Лукьянова С.А., Римский-Корсаков Н.А., Рычагов Г.И., Свиточ А.А., Сидорчук А.Ю., Сычёв В.В., Чернов А.В. М.: ГЕОС, 2002. 240 с.
- 3) Акуз И.К., Демьяненко Е.В., Терещенко Н.П. Сводный отчет о комплексной инженерно-геологической съемке Волго-Ахтубинской поймы и дельты р. Волги масштаба 1:100000 за 1956-60 гг. (М-38 и L-39). Ростов-на-Дону, 1961. Том 1. 2597 л.
- 4) Штыркова Е.И., Полякова Е.И., Ткач Н.Т. Диатомовые водоросли в современных донных осадках дельты Волги на территории Дамчикского участка Астраханского биосферного заповедника / Природные экосистемы Каспийского региона: прошлое, настоящее и будущее. Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию Астраханского государственного заповедника. Астрахань: типография "Мир", 2019. С. 180-183.

КРАТКИЕ ИТОГИ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ ПЮИ ДЕ ФОЛЬ (САХ) В 2022-23 ГОДАХ

Люткевич А.Д.¹, Добрецова И.Г.², Кулаженок М.Н.², Яговкина М.А.³

¹ФГБУН Геологический Институт РАН, г. Москва

²АО Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция, г. Ломоносов

³ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: гидротермальные проявления, Срединно-Атлантический Хребет, Пюи де Фоль, металлоносные и карбонатные донные осадки, морская геология.

Подводный вулкан Пюи де Фоль, расположенный в Российском Разведочном Районе Срединно-Атлантического Хребта (РРР САХ), был открыт в 1996г французскими исследователями. В кальдере вулкана расположено одноимённое гидротермальное поле, границы и рудные тела которого, а также подстилающие породы были установлены и изучены ранее в рейсе 31 НИС «Профессор Логачёв» в 2008г [1].

В 2022 началась поисково-оценочная стадия освоения РРР САХ, требующая более детального изучения найденных ранее рудных объектов. Одним из важных пунктов исследования проявлений гидротермальной деятельности на океаническом дне является изучение донных осадков. Данные, полученные в ходе 45, 46 и 47 рейсов НИС «Профессор Логачёв», дополняют полученные ранее.

За центр рудного поля Пюи де Фоль, расположенного в интервале глубин 1940-2000м, приняты координаты 20°30´ с.ш., 45°38´ з.д. Подстилающими породами являются базальты. В строении рудного поля участвуют различного рода метасоматические образования по биогенным карбонатным осадкам: сульфидные руды, оксигидроксидножелезистые корки, интенсивно опализированные рудные образования. Сульфидные руды представлены цинково-медно-колчеданным (Zn-Cu-Fe) и серноколчеданным (Fe-S) типами.

По площади рудного поля осадки распределены достаточно равномерно и покрывают около 75-80% его поверхности. При этом их мощность не достигает 1 м. Осадки представлены птероподовыми, кокколито-фораминиферовыми илами и дресвой вулканического стекла, а также бескарбонатными глинистыми коричневыми металлоносными метасоматически изменёнными осадками, отмеченными вблизи рудных тел. По результатам телепрофилирования и пробоотбора можно выделить следующие разновидности донных осадков:

- Фоновые биогенные карбонатные осадки бежевого цвета, мощностью до 31 см (по результатам опробования, станция 46L018k), имеют самое широкое распространение на площади участка. Чаще всего они сложены кокколито-фораминиферовыми илами с различным количеством детрита птеропод и другой фауны и вулканического стекла изогнутых форм. Результаты потенциометрических измерений не имеют закономерности в распределении от поверхностных горизонтов к забою.

- Металлоносные, коричнево-рыжие метасоматически изменённые осадки развиваются вдоль трещин в подстилающих базальтах; в виде круглых пятен, маркирующих каналы выхода гидротермального флюида, на поверхности биогенных карбонатных осадков; формируют сплошные покровы.

- Осадки с ярозитом, имеющие ярко-жёлтую окраску, заметную при телепрофилировании, приурочены к рудным телам.

- Осадки с минералами группы атакамита имеют ярко-зелёную окраску, заметную при телепрофилировании. Последние 3 типа на рудном поле Пюи де Фоль выявлены только по результатам телепрофилирования и имеют ограниченное распространение.

- Осадки, насыщенные глауконитом, на видео имеют буровато-зеленоватый цвет. На станции 46L036g была отобрана колонка ненарушенного глауконитового осадка мощностью 52 см.

В поверхностном слое глауконитовых осадков в изобилии присутствуют реликты фауны (частично замещенные гидроксидами железа хитиновые трубки червей, фрагменты раковин). Диагностированный на судне иммерсионным методом глауконит-нонронит был подтвержден в ходе дальнейших лабораторных исследований рентгенофазовым анализом (аналитик Яговкина М.А.). На судне для верхней (0-3 см) и нижней (47-52 см) частей разреза был проведен шлихоминералогический анализ. Породообразующие минералы представлены вулканическим стеклом, имеющим изогнутую и закрученную форму, единичными знаками пироксена, оливина, обломков базальта. Содержание вулканического стекла резко преобладает в поверхностном слое (до 35% лёгкой фракции). Из второстепенных минералов выявлен магнетит в виде сростков мелких кристаллов и шариков в поверхностном горизонте и сростков с пиритом в забое колонки. Минералы-индикаторы гидротермальной деятельности представлены пиритом различных форм выделения, в том числе в виде псевдоморфоз по трубкам червей; халькопиритом, часто идиоморфным, со штриховкой на гранях и плёнками побежалости; сфалеритом, отмеченным только в поверхностном горизонте в виде сростков идиоморфных кристаллов; сульфидами меди; минералами группы атакамита, представленными большим разнообразием форм выделений и оттенков характерного зелёного цвета, в том числе в виде псевдоморфоз по раковинам фораминифер; баритом и гидроксидами железа, чаще в виде комков порошковатых выделений, а так же в виде псевдоморфоз по трубкам червей и фораминиферам.

Краткий итог изучения осадочного чехла рудного поля Пюи де Фоль состоит в следующем: 1) выделены 5 типов осадка, по двум из которых проведено опробование; 2) глауконитовые осадки мощностью 52 см впервые выявлены на территории РРР САХ и требуют дальнейшего более подробного изучения; 3) многочисленные псевдоморфозы пирита, атакамита и гидроксидов железа по фауне в колонке 46L036g свидетельствуют о преобразовании осадка в ходе пропитки гидротермальным флюидом. О схожих изменениях раковин фораминифер под влиянием гидротермальных флюидов на примере рудного узла Победа говорится в работе И.Ф. Габлиной и др., 2019 [2].

Рейсы 45, 46 и 47 НИС «Профессор Логачёв» организованы АО Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция и АО Росгеология. Автор принимала участие в рейсах в рамках темы госзадания FMMG-2023-0008 (ГИН РАН).

Список литературы

- 1) Марков В.Ф., Самоваров М.Л., Сергеев М.Б. и др. геолого-геофизические исследования с целью выделения участков, перспективных на ГПС, в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (в пределах 19 - 21 с.ш.) и поисковые работы на участке 22 30 с.ш. // Отчет 31-го рейса НИС «Профессор Логачёв». Ломоносов. ФГУНПП ПМГРЭ. 2009.
- 2) Габлина И.Ф., Дмитренко О.Б., Хусид Т.А., Либина Н.В. Влияние флюидов на видовой состав и сохранность микрофоссилий в биогенных карбонатных осадках гидротермального узла «Победа» (Срединно-Атлантический хребет) // Литология и полезные ископаемые № 6. 2019. С. 592-606

ЛИТОЛОГО-ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

Малицкий С.И.^{1,2}, Яцук А.В.², Аксентов К.И.², Швалов Д.А.²

¹Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: донные отложения, метан, углеводородные газы, гранулометрический состав, водно-физические свойства, Авачинская губа, Камчатка

Повышенные концентрации метана (CH_4) в донных осадках могут свидетельствовать о поступлении термогенных (эпигенетических) газов и наличии зон фокусированной разгрузки, что говорит о высоком нефтегазоносном потенциале данного района. Но высокие концентрации метана не всегда вызваны потоком из глубины осадочного чехла. Для того, чтобы наиболее точно установить происхождение повышенных концентраций метана в том или ином районе необходимо знать фоновое региональное содержание и концентрацию его гомологов. Этан и пропан как правило, имеют термогенное происхождение. В отличие от них присутствие этилена и пропилена, обусловлено в основном биохимическим и микробиальным процессам, сопутствующим процессам деструкции органических веществ. На количественные параметры газосодержания большое влияние могут оказывать литологические свойства (литотип осадка, плотность, пористость, влажность и др.) и содержание органического вещества в донных отложениях. Взаимное изучение литолого-газогеохимических особенностей отложений позволяет косвенно судить о предполагаемом генезисе углеводородных газов [1, 2].

Исследования проведены на 3 комплексных станциях в Авачинской губе, восточном побережье полуострова Камчатка, на глубине моря от 21 до 25 м. Данные собраны отрядом морской геологии и лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН в ходе рейса № 23/4 НИС «Профессор Мультиановский» (август-сентябрь 2023 г.) в рамках программы «Плавающий университет».

Отбор донных отложений осуществлялся с помощью коробчатого пробоотборника «Box Core». Отбор проб осадка на различные виды анализов производился оперативно на борту судна непосредственно после подъема осадочного материала. В случае достаточной мощности осадка в «Box Core» помещались трубки ПВХ для отбора коротких колонок, длиной до 50 см. Всего подобным методом отобрано 3 колонки для поинтервального изучения кернов - 50 см (станция № 1BC), 31 см (№ 2BC), 40 см (№ 3BC). Отбор проб осадка на водно-физические свойства проводился модифицированным методом режущего кольца в герметичные емкости. Горизонты отбора соответствовали горизонтам, где брались пробы для анализа содержания газообразных соединений в осадке. В дальнейшем, часть объема высушенных образцов проб использовалась для гранулометрического анализа на лазерном анализаторе частиц Analyzette 22 Nano Tech (Frich, Германия). Статистическая обработка полученных данных проводилась в программе StatSoft®Statistica. Также производился анализ на цветность с помощью спектрального калориметра CHN Spec CS-288 (КНР). Запись информации производилась в координатах цветовой модели CIE $L^*a^*b^*$. Для определения окислительно-восстановительного потенциала использовался ОВП-метр Kelilong-ORP 169E (КНР). Газогеохимические исследования донных отложений выполнялись на борту судна методом равновесных концентраций «HeadSpace». Анализ газового состава проводился на газовом хроматографе «КристалЛюкс-4000М» («Метахром», РФ) по аттестованным методикам лаборатории газогеохимии ТОИ ДВО РАН. Всего в ходе исследований отобрано 12 серий проб для газогеохимических, водно-физических и литологических анализов.

Проведенные литолого-газогеохимические исследования являются новыми для Авачинской губы. По результатам гранулометрического анализа колонки станции № 3BC определено, что донные отложения в значительной степени состоят из алевритовой и песчаной фракций (преобладающий

тип осадка – алеврит песчанистый и песчанистый алеврит). Обнаружена тенденция увеличения содержания алевритовой фракции (до 81 %), пелитовой фракции (до 8 %) и уменьшения песчанистой фракций к нижним интервалам (с 43 до 11 %). Донные отложения обводненные, с значениями естественной влажности в пределах 54–70 %, с тенденцией уменьшения значений к нижним интервалам. Значения естественной и сухой плотности осадков варьируют в пределах 1,2–1,4 г/см³ и 0,4–0,6 г/см³ с максимальными значениями в нижних интервалах. Особенности литологических характеристик отложений определяют соответствующие высокие значения общей пористости (74–88 %) и достаточно низкие значения открытой пористости (7–22 %). Данный факт может оказывать существенное влияние на газонасыщенность донных отложений. Стоит отметить, что в обследованных донных осадках Авачинской бухты распространена восстановительная среда с резким запахом сероводорода и низкими значениями окислительно-восстановительного потенциала.

В газовом составе донных отложений обнаружены: метан в концентрациях от 28 до 2648 ppm, этан от 0,15 до 4,94 ppm, пропан от 0,03 до 0,26 ppm, этилен от 0,12 до 1,76 ppm, пропилен от 0,02 до 0,2 ppm и углекислый газ от 0,65 до 2,12 %. В целом в донных осадках Авачинской губы отмечены высокие средние концентрации метана – 904,2 ppm, в то время как в открытой части акваторий Восточной Камчатки – 7,3 ppm. Максимальные концентрации метана и его предельных гомологов (этан, пропан) приурочены к нижним интервалам колонок с соответствующим градиентом роста от поверхности до низа кернов. Это предполагает существование миграции углеводородных газов (УВГ) с нижележащих горизонтов отложений. В тоже время непредельные гомологи метана – этилен и пропилен, наоборот, меняются пилообразно, а уровень их концентраций меньше этана и пропана при поинтервальном сравнении, кроме поверхностного горизонта 0–10 см.

Исходя из вышеперечисленного, уместно говорить о смешанном генезисе УВГ, обусловленном влиянием нескольких факторов: повышенным осадконакоплением и аккумуляцией органического вещества (речной сток р. Авача), антропогенным влиянием г. Петропавловск-Камчатский и структурно-геологическим строением региона (газонасыщенность подстилающих отложений, наличие разломной тектоники и сейсмоактивность района исследований).

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования за финансовую поддержку программы «Обучение через исследования «Плавающий Университет» (соглашение № 075-01593-23-06). Газогеохимические аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00321 (<https://rscf.ru/project/23-27-00321/>).

Список литературы

- 1) Гресов А.И., Яцук А.В., Аксентов К.И. Литологический состав и углеводородные аномалии донных отложений западной части Восточно-Сибирского моря // Литология и полезные ископаемые, 2023, № 1, с. 1-17.
- 2) Петухов А.В., Старобинец И.С. Основы теории геохимических полей углеводородных скопленений. - М.: Недр, 1993. - 332 с.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН ЗА 2021-2023 ГОД

Мамонтов А.Е., Репина И.А.

Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Ледники, Шпицберген, квадрокоптер, профильные измерения, альbedo, тепловой баланс, инверсия, тропосфера, Арктика

В рамках экспедиционных работ на архипелаге Шпицберген, выполнявшихся в период с 2 по 11 сентября 2021 года, проведены рекогносцировочные измерения температурно-ветровой стратификации атмосферы в условиях сильно неоднородного ландшафта в окрестностях поселка Баренцбург. Для этого использовался измерительный комплекс на базе беспилотного летательного аппарата, квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro с комплектом метеорологических датчиков iMet-XQ2. Методика измерений позволяет получать вертикальные профили основных метеорологических величин в нижней тропосфере – температуры и влажности воздуха, скорости и направления ветра в нижних 500 м [1-2]. Для базовой точки мониторинга, расположенной в поселке Баренцбург, рядом с Научно-исследовательской базой Кольского научного центра РАН, измерения проводились в квазирегулярном режиме в сроки, приближенные к срокам стандартных метеорологических измерений (за исключением ночных сроков), вертикальный диапазон измерений составлял от 250 до 500 м в зависимости от погодных условий. Один раз в сутки выполнялись синхронные измерения над базовой точкой и над водной поверхностью Грен-фьорда, на расстоянии около 500 метров от базовой точки. Кроме того, в ходе полевых выездов проводились профильные измерения в районе нижней границы ледников в окрестностях Баренцбурга. В ходе каждого из этих полевых выездов проводились серии профильных измерений с дискретностью около 30 минут и продолжительностью 3-4 часа, вертикальный диапазон измерений составлял 200-300 м. Кроме профильных измерений, для всех точек мониторинга проводилось картирование термической неоднородности подстилающей поверхности с помощью тепловизора Flir TAU 2R, установленного на квадрокоптере DJI Mavic 2 Zoom.

В течение следующей экспедиции, отправленной через год., решалось два блока задач по изучению структуры пограничного слоя атмосферы в условиях сильно неоднородного ландшафта. Первый блок был направлен на изучение турбулентного теплообмена над поверхностью ледника Альдегонда с использованием ультразвукового анемометра, второй блок – на изучение вертикального распределения метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы над различными типами ландшафтов с использованием беспилотных квадрокоптеров, оборудованных метеорологическими датчиками. Работы выполнялись силами двух экспедиционных отрядов. Работа первого отряда на архипелаге включала 4 полевых выхода, в ходе которых была выполнена установка акустического анемометра на леднике Альдегонда, проверка его работоспособности, а также выполнение нескольких серий профильных измерений с квадрокоптерами на ледниках Альдегонда, Западный Грен-фьорд и в долине Холландер. После отъезда первой группы, измерения на леднике Альдегонда продолжались, проверка работоспособности акустического анемометра и замена элементов питания осуществлялась коллегами из экспедиционного отряда ААНИИ. Работа второго экспедиционного отряда ИФА РАН включала еще 4 полевых выхода, в ходе которых было выполнено снятие акустического анемометра с ледника Альдегонда и проведение еще несколько серий профильных измерений на ледниках Альдегонда, Западный Грен-фьорд и Эсмарка. Кроме того, профильные измерения с использованием квадрокоптеров проводились обеими группами во время нахождения в Баренцбурге в перерывах между полевыми выходами.

Основной целью летнего этапа работ экспедиции 2023 года являлось исследование особенностей теплового баланса снежно-ледниковых покровов архипелага Шпицберген в период абляции [3].

Работа производилась в следующих направлениях:

- Исследование отражательных способностей поверхностей ледников Альдегонда и Западный Грен-фьорд, зависящих от их загрязненности и особенностей рельефа;
- Исследование радиационного баланса и микроклиматических особенностей поверхности ледника Альдегонда;
- Исследование распределения температур внутри ледника;

В результате проделанной работы к концу этапа были решены следующие задачи: заменены элементы питания, проведена профилактика, контроль, ремонт и считывание данных с автоматических метеостанций Onset HOBO, расположенных на леднике Альдегонда, а также проведены подспутниковые маршрутные съемки альbedo на двух ледниках – Альдегонда и Западный Грен-фьорд.

Предварительный анализ данных профильных измерений на архипелаге Шпицберген за 2021-23 гг. позволил диагностировать широкий ряд эффектов, характеризующих влияние неоднородного ландшафта на температурную и ветровую стратификацию нижней тропосферы. Измерения на ледниках позволили диагностировать эффект стокового ледникового ветра, выраженный в усилении приземной скорости ветра и резким изменением направления ветра выше определенной высоты. В профиле температуры при этом наблюдалась приземная инверсия глубиной в 1-2 °С и вертикальной протяженностью в 20-30 м. Примечательно, что толщина слоя, в которой наблюдался стоковый ветер, была не постоянна во времени. Также измеренные данные позволили получить новую информацию о структуре и динамике особенностей пограничного слоя атмосферы над неоднородными ландшафтами архипелага Шпицберген. Повторные измерения в Баренцбурге показали присутствие эффекта, ранее диагностированного в ходе экспедиции 2021 года, а именно инверсию профиля скорости ветра с максимумом вблизи поверхности и уменьшением скорости с высотой. В обоих случаях такая картина наблюдалась на фоне интенсивного дневного прогрева поверхности и сверхадиабатических градиентах температуры вблизи склона фьорда. Однако в 2021 году при этом ветер вдоль фьорда (с севера), а в 2022 году – под углом 45 ° к оси фьорда (с юго-запада). Профильные измерения на ледниках показали, что скорость и вертикальная структура формирующегося над ними кatabатического ветра претерпевает существенную изменчивость как во времени (по данным измерений прошлого года), так и в пространстве.

Работы финансируются ИФА РАН за счет темы государственного задания

Список литературы

- 1) Varentsov M., Stepanenko V., Repina I., Artamonov A., Bogomolov V., Kuksova N., Marchuk E., Pashkin A., Varentsov A. Balloons and Quadcopters: Intercomparison of Two Low-Cost Wind Profiling Methods // Atmosphere. 2021. V. 12. № 3. P. 380.
- 2) Varentsov M.I., Yu Artamonov A., Pashkin A.D., Repina I.A. Experience in the quadcopter-based meteorological observations in the atmospheric boundary layer // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 231. P. 012053
- 3) Прохорова У. В., А.В. Терехов, Б.В. Иванов, С.Р. Веркулич. Расчет составляющих теплового баланса ледника Альдегонда (Западный Шпицберген) в период абляции по данным наблюдений 2019 года // Криосфера Земли. – 2021. – Т. 25. – №. 3. – С. 50-60.

ПРИМЕНЕНИЕ ЩЕЛОЧНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ КРЕМНЕЗЕМА ДЛЯ ПОРОД КАЙНОЗОЯ И РАННЕГО ПАЛЕОЗОЯ: МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Меренкова С.И.¹, Михеев И.В.², Калмыков Г.А.², Габдуллин Р.Р.², Широян М.М.²

¹ *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

Ключевые слова: аморфный кремнезем, опал-КТ, глинистые минералы, неоген, кембрий

Круговорот кремнезема в Мировом океане фанерозоя тесно связан с биологической активностью, а переход от полностью абиогенного осаждения кремния к преимущественно биогенному, произошел начиная с кембрия. В современном океане доминирующая группа силицификаторов - диатомовые водоросли, также участвуют силикофлагелляты и радиолярии. В кембрии из осаждающих кремнезем организмов существовали только радиолярии и губки. Для биогенного опала свойственны фазовые переходы с течением времени по цепочке опал-кristобалит-тридимит, который в конечном итоге превращается в халцедон и кварц. Количественное определение аморфного (биогенного) кремнезема (BSi) осуществляется различными методами: ИК-спектроскопии, спектрофотометрии, рентгеновской дифрактометрии после превращения в кристобалит, нормативный расчет, а также путем прямого подсчета кремнистых микрофоссилий. Все эти методы имеют свои ограничения в зависимости от количества и источника аморфного кремнезема и от состава минеральной матрицы. Метод щелочного разложения, основанный на различной кинетике реакции Na_2CO_3 (или NaOH) между аморфным биогенным опалом и кристаллическим кварцем широко используется в международной практике. Оценки величины глобальной среднегодовой продукции и растворения биогенного кремнезема в океане постоянно обновляются [1]. Но щелочное разложение биогенного кремнезема не всегда эффективно для извлечения всего BSi, присутствующего в отложениях, особенно для сильно окремненных раковин диатомей, радиолярий или спикул губок [2]. Пробелы в рутинных процедурах выщелачивания для количественной оценки общего BSi привело к существенной недооценке захоронения Si в Мировом океане. Захоронение в осадке «скрытого BSi» («*dark BSi*»), количественно определяемого по скелетам губок и радиолярий, увеличивает на 28,6% предыдущее значение биологического стока Si, учитывавшее только диатомей [2]. В связи с этим П. Трегер и соавторы [1] отмечают, что аналитические усилия по количественному определению BSi из различных источников отложений и организация международного сравнительного анализа имеют высокий приоритет для будущих исследований.

Метод щелочного разложения имеет множество вариаций, но все варианты берут за основу либо последовательную экстракцию по времени с измерением только Si [3], либо последовательной экстракции с измерением концентрации Si и Al в растворе по времени [4], либо одностадийный подход [5]. Так, Д. ДеМастером [3] была предложена «идеальная» кривая растворения биогенного кремнезема в осадках, где экстраполяция глинистой линии на нулевое время вычитала бы вклад кремнезема из литогенной фракции и, таким образом, дала бы содержание BSi в образце. Но на содержание биогенного опала при использовании более сильного основания (NaOH) оказывает влияние количество глинистых минералов и кварца в образце. А. Каматани и О. Оку [6] описали подход к коррекции содержания небиогенного кремния (из литогенной основы) образца с помощью линейной регрессии экстрагированного Si, построенной по отношению к экстрагированному Al, т.к. при щелочном разложении наблюдались сильные линейные зависимости между высвобождением Si и Al из глинистых минералов – аллофан, каолинит, иллит, монтмориллонит.

В нашем исследовании использовались неогеновые алевролиты (BSi в виде раковин диатомей), в которых отмечается присутствие кварца и глинистых минералов. В кембрийских породах

кремнезем представлен опалом-КТ, халцедоном и кварцем, количество глинистых минералов варьирует от 0 (известняк и кремьень) до 27% (алевролиты, породы смешанного кремнисто-глинисто-карбонатного состава). Предварительно был определен минеральный состав исследуемых пород методом XRD (MiniFlex600 Rigaku), на основании чего были выбраны наиболее репрезентативные по количеству вышеуказанных групп минералов образцы. В данном исследовании адаптирована усовершенствованная С. Ивасаки [7] методика выщелачивания Р.А. Мортлок и Ф.Н. Фрелих [5]. В связи с устойчивостью радиолярий к раствору Na_2CO_3 и переходом опала-А в опал-КТ, используется 2М раствор NaOH . Измерение проводили с помощью ICP-AES Agilent 720-ES. В растворах измеряли концентрации Si и Al, т.к. количество Al является мерой разложения глинистых минералов.

В результате проведенных экспериментов по выщелачиванию, установлено, что из трех способов подсчета содержания аморфного кремнезема из общего измеренного содержания Si в кембрийских породах с низким содержанием такового, наиболее оптимальными становятся методы Si/время и Si/Al [3,4]. При незначительном расхождении между средними полученными этими двумя методами величинами аморфного кремнезема (условного BSi), для терригенных пород предпочтительным является метод Si/Al. Установлено, что необходимым условием при определении является масса навески не менее 100 мг, т.к. опал-СТ распределен в породе крайне неравномерно. Такой метод определения содержания аморфного кремния в присутствии глинистых минералов является эффективным, но весьма трудоемким, по сравнению с, например, ИК-спектроскопией.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИО РАН имени П.П. Ширшова

Список литературы

- 1) Tréguer P.J., Sutton J., Brzezinski M., Charette M., Devries T., Dutkiewicz S., Ehlert C., Hawkings J., Leynaert A., Liu S., Monferrer N., López-Acosta M., Maldonado M., Rahman S., Ran L., Rouxel O. Reviews and syntheses: the biogeochemical cycle of silicon in the modern ocean // *Biogeosciences*. № 4 (18). 2021. P. 1269-1289.
- 2) Maldonado M., López-Acosta M., Sitjà C., García-Puig M., Galobart C., Ercilla G., Leynaert A. Sponge skeletons as an important sink of silicon in the global oceans // *Nat. Geos.* 12. 2019. P. 815-822.
- 3) De Master D.J The supply and accumulation of silica in the marine environment // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 45. 1981. P. 1715–1732
- 4) Eggemann D.W., Manheim F.T., Betzer P.R. Dissolution and analysis of amorphous silica in marine sediments // *J. Sed. Petr.* 51. 1980. P. 215-225
- 5) Mortlock R.A., Froelich P.N. A simple method for the rapid determination of biogenic opal in marine sediments // *Deep-Sea Res.* 36. 1989. P. 1415–1426.
- 6) Kamatani A., Oku O. Measuring biogenic silica in marine sediments // *Mar. Chem.* 68. 2000. P. 219-229
- 7) Iwasaki S., Takahashi K., Ogawa Y., Uehara S., Vogt C. Alkaline leaching characteristics of biogenic opal in Eocene sediments from the central Arctic Ocean: a case study in the ACEX cores // *J. Oceanogr.* №3 (70). 2014. P. 241-249

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ОСАЖДАЮЩЕМСЯ ВЕЩЕСТВЕ В СЕДИМЕНТАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОГО БАССЕЙНА

Мигдисова И.А., Стародымова Д.П., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Булохов А.В.

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: осадочное вещество, седиментационные ловушки, гидротермальный плюм, микроэлементы, формы нахождения, потоки частиц, седиментогенез.

Изучение процессов современного осадкообразования позволяет нам проводить реконструкции условий среды прошлого, помогая отслеживать климатические и гидрологические изменения в интересующих нас седиментационных системах морей и океанов. В открытом океане помимо континентального сноса существует множество источников поступления осадочного вещества – жизнедеятельность микроорганизмов, ледовый и айсберговый разнос, деятельность гидротермальных плюмов [1]. Особый интерес представляют исследования состава и потоков осадочного вещества в водной толще в течение года в акваториях, прилегающих к подводным гидротермальным проявлениям. Изучение геохимических форм нахождения элементов в осадочном веществе позволяет определить их подвижность, источники и процессы, ведущие к накоплению вещества в осадочном материале.

В работе приведены результаты исследования осадочного вещества Норвежско-Гренландского бассейна в районе сочленения хребтов Мона и Книповича вблизи расположения гидротермальных полей. Главной целью работы стал мониторинг изменчивости элементного и компонентного состава осадочного вещества в течение года в ходе процессов седиментогенеза. Для выявления источника поступления взвеси в толщу воды был выполнен следующий ряд исследований: оценены потоки вещества с двумя видами изменчивости – по месяцам в течение года и на разных глубинах водной толщи; определены компонентный и микроэлементный составы отобранного материала; проведено определение степени подвижности металлов в осадочном веществе методом последовательных вытяжек. Вещество было отобрано с помощью автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС) [2], установленных в ходе двух рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2019 г (годовая постановка АГОС) и в 2021 г (временная постановка АГОС). В комплектацию АГОС входили седиментационные ловушки («Лотос-3» и «МСЛ-110»), расположенные на разных глубинах в одном и том же районе.

Обработка осадочного вещества для определения форм нахождения в них химических элементов проводилась методом последовательной четырехступенчатой химической экстракции различными реагентами, различающимися по типу связи с осадком [3]. Валовый микроэлементный состав осадочного вещества был определен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Agilent 7500a после разложения пробы в смеси концентрированных кислот (HNO_3 , HF , H_2O_2 , HCl). Содержание общего и органического углерода измеряли на анализаторе ТОС-L фирмы Shimadzu с приставкой SSM-5000A. Содержания Si и Al были определены фотометрическим методом.

Глубинное распределение потоков осадочного вещества имеет бимодальную форму – максимумы зарегистрированы в подповерхностном горизонте ($89,4 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$), что характеризует поступление осадочного вещества преимущественно биогенного происхождения из деятельного слоя, и в придонном ($244,0 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$), что отображает влияние нефелоидного слоя [4]. Сезонное распределение осадочного вещества схоже с распределением среднегодовых потоков в Лофотенской котловине,

что ранее было показано в работе [5].

Состав осадочного вещества существенно различается на разных горизонтах опробования. Так, верхний горизонт водной толщи обогащен относительно среднего состава земной коры рядом элементов: Zn, Sr, As, Cd. Осадочное вещество придонного горизонта помимо перечисленных элементов значительно обогащено Mn и Ba. Также отметим, что с глубиной возрастает умеренное обогащение железом, а отношение Fe/Al достигает значений 0,76, что в 1,5 выше, чем значения, полученные для осадочного вещества промежуточных горизонтов, отобранного на востоке Норвежского моря [4]. Такое распределение состава осадочного вещества может быть связано с распространением частиц гидротермального происхождения в составе гидротермальных плюмов нейтральной плавучести, которые переносятся течениями на расстоянии в десятки километров от источника [6].

В осадочном веществе были выделены четыре формы нахождения металлов в осадочном веществе: 1) адсорбционно-обменный комплекс и карбонаты; 2) окси-гидроксидный комплекс; 3) органическое вещество и сульфиды; 4) остаточная форма (кристаллическая/силикатно-обломочная). Алюминий, как типичный представитель литогенных элементов, в большей части находится в литогенной форме, представленной обломочными и глинистыми минералами (до 80% от суммы форм). Железо, также как и Al, в основном связано с остаточной формой (до 75% от суммы форм), хотя его доля в окси-гидроксидном комплексе также значима. По соотношению Fe/Al можно сделать вывод, что на глубинных горизонтах водной толщи выявлено преобладание терригенного материала. До 50–90% Mn связано в первой форме и, в значительно меньшей степени, в третьей, что свидетельствует об активном накоплении этого элемента в результате гидrogenных процессов адсорбции-десорбции. 45–65 % Cu находится в третьей форме, характеризующей органические соединения и сульфиды, что объясняется образованием металлорганических соединений с биогенным веществом [3].

Исследование выполнено в рамках Госзадания ИО РАН, тема FMWE-2024-0020. Работа АГОС поддержана РФФ, проект № 20-17-00197.

Список литературы

- 1) Лисицын, А.П. Процессы океанской седиментации. М.: Наука. - 1978. - 392 с.
- 2) Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Филипов А.С., Политова Н.В. Рассеянные формы осадочного вещества и их потоки в океанах и морях на примере Белого моря (результаты 12 лет исследований) // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 3. С. 355–359.
- 3) Лукашин, В.Н. Нефелоидный слой и горизонтальные потоки осадочного вещества в Норвежском море / В.Н. Лукашин, А.Д. Щербинин // Океанология. - 2007. - Т. 47, № 6. - С. 894–908.
- 4) Rauret, G. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials / G. Rauret, J.F. Lopez-Sanchez, A. Sahuquillo, R. Rubio, C. Davidson, A. Ure and Ph. Quevauviller // Journal of environmental monitoring. - 1999. - V. 1. - P. 57-61.
- 5) Мигдисова, И.А. Изменчивость состава рассеянного осадочного вещества в водной толще Лофотенской котловины норвежского моря / И.А. Мигдисова, Д.П. Стародымова, А.Н. Новигатский, А.А. Клювиткин, А.В. Булохов // Морские исследования и образование: Сборник трудов X Международной научно-практической конференции, Тверь, 25-29 октября 2021 года. - Тверь: ООО «ПолиПРЕСС». - 2021. - С. 163-166.

- 6) German, C.R. Particle recycling in the TAG hydrothermal plume / C.R. German, R.S.J. Sparks
// Earth and Planetary Science Letters. - 1993. - V. 116, № 1-4. - P. 129-134.

ЛИТОЛОГИЯ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РАЙОНЕ КОНТУРИТОВЫХ ДРИФТОВ АКАДЕМИЧЕСКОГО ХРЕБТА ОЗЕРА БАЙКАЛ

Немченко Н.В.^{1,2}, Дорохова Е.В.³, Уголькова Е.А.¹, Соловьева М.А.¹,

¹Московский государственный университет М.В. Ломоносова, г. Москва

²Апрелевское отделение Всероссийского научно-исследовательского геологического нефтяного института, г. Апрелевка

³Институт океанологии им. П.П.Широва, РАН, г. Москва

Ключевые слова: озерные контуристы, магнитная восприимчивость, гранулометрический состав, литостратиграфия.

Изучение контуристов – осадков, отложенных или переотложенных придонными течениями, – набирает популярность в современном научном сообществе. Это связано не только с широким распространением данного генетического типа отложений в акваториях Мирового океана, но и с большим их значением для палеоокеанологии и нефтегазовой седиментологии [1]. Контуристовые системы описаны в основном на подножиях континентальных склонов в Мировом океане, где изучены их основные литологические и сейсмические признаки, охарактеризована стадийность их строения, вариативность состава, даны морфологические классификации [1,2]. Однако в пресноводных озерах этот тип отложений исследован очень слабо. Данная работа посвящена изучению литологии выявленных ранее контуристов в районе Академического хребта озера Байкал.

Серия небольших контуристовых дрифтов и каналов была выявлена на основе данных сейсмоакустического профилирования в районе поднятого и опущенного блоков Академического разлома [3]. В ходе летней экспедиции Class@Baikal 2022 года в рамках Международной программы “Training-through-Research (TTR)”, были опробованы донные отложения на валообразных формах поднятого (колонка BL22_519, глубина 309,7 м, длина 444 см) и опущенного (колонка BL22_518, глубина 478,8 м, длина 519 см) блоков в районе распространения покровного (sheeted) и фрагментарного (patched) контуристовых дрифтов, соответственно [3].

Разрез колонки BL22_519 представлен крайне нетипичными для акватории озера переслаиваниями ледниково-межледниковых отложений с предположительно низкими скоростями осадконакопления. Верхняя часть разреза представлена голоценовой диатомово-глинистой пачкой мощностью около 40 см. Четкая резкая горизонтальная граница отделяет нижележащие мощные переслаивания глинистых илов, диатомово-глинистых илов, алевро-глинистых илов и плотных, литифицированных глин, предположительно разного генезиса и возраста. Границы между выделенными толщами четкие, резкие, предположительно эрозионные. Осадки толщ существенно отличаются друг от друга: наблюдается попеременное изменение коричневых и серых цветов, не связанное с окислительно-восстановительными обстановками системы «вода-порода», также наблюдается циклическая смена вещественного состава осадков, от преимущественно терригенных к терригенно-биогенным. Терригенные ледниковые толщи представлены алевро-пелитовыми глинами и глинистыми илами преимущественно коричнево-серого и серого оттенка, биогенные межледниковые толщи представлены диатомово-глинистыми и алевро-глинистыми илами преимущественно серого цвета с зеленоватым оттенком. Повышенные значения магнитной восприимчивости зарегистрированы в терригенных разностях (до $4-6,5 \times 10^4$ SI), пониженные – в терригенно-биогенных (до $1,5 \times 10^4$ SI). Отношение Si/Ti, характеризующее содержание биогенного кремнезема [4], имеет повышенные значения в терригенно-биогенных осадках. Согласно предварительному литостратиграфическому расчленению, осадки терригенных пачек отнесены к ледниковым интервалам, а терригенно-биогенных – к межледниковым, всего выделено пять циклов. Границы между ледниково-межледниковыми циклами характеризуются прослоями уплотненных глин, что может быть связано с эрозией осадка придонными течениями. По разрезу колонки наблюдаются маломощные

(до 5 мм) линзы, преимущественно субгоризонтальной ориентировки, сложенные песком мелко-тонкозернистым алевритовым, слабо-средне окатанным. Гранулометрический состав отложений характеризуется одномодальными распределениями в терригенно-биогенных толщах и бимодальными в терригенных, что может быть связано с дополнительным источником поступления материала и/или повышенными скоростями придонных течений.

Разрез колонки BL22_518 представлен фоновыми (гемипелагическими) Байкальскими глубоководными осадками. Верхняя часть разреза (92 см) представлена голоценовыми диатомово-глинистыми илами. Через постепенный переход они сменяются верхнеплейстоценовыми алевро-глинистыми, более уплотненными, «масленистыми» илами. Наблюдается маломощный до 3 см придонный окисленный слой и типичная миллиметровая корка хардграунда коричневого цвета под окисленным слоем. По всему разрезу наблюдается неритмичное тонкое горизонтальное пере-слаивание, характерное для озерного типа отложений, выраженное в смене оттенков серого цвета осадков и прослойков, обогащенных гидротроилитом. Результаты измерения магнитной восприимчивости по разрезу колонки также показывают небольшие значения в верхней голоценовой шапке - $0,5 - 1,5 \times 10^4$ SI, постепенно увеличивающиеся и стабилизирующиеся в диапазоне $4-6 \times 10^4$ SI в нижней верхнеплейстоценовой части.

Таким образом, осадки, слагающие разрез колонки BL22_519 отнесены к контуристам, поскольку имеют типичные признаки влияния придонных течений: эрозионные горизонты, песчаные линзы, чередование пачек с различным гранулометрическим составом [1,2]. Низкие скорости осадконакопления вероятно вызваны эрозией осадка придонными течениями, имеющими максимальные скорости на периферии покровного дрефта. Осадочный разрез колонки BL22_518, отобранной на вершине фрагментарного дрефта, представлен фоновыми гемипелагическими илами, возможно перекрывающими контуристовое тело дрефта.

Финансирование отсутствует.

Список литературы

- 1) Rebesco M., Hernández-Molina F. J., Van Rooij D., Wåhlin A. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 111–154.
- 2) Rebesco M. Sedimentary environments: contourites / In: *Encyclopedia of Geology*. Ed. D. Stow et al. // Elsevier. 2004. P. 2–15.
- 3) Ceramicola S., Rebesco M., De Batist M., Khlystov O. Seismic evidence of small-scale lacustrine drifts in Lake Baikal (Russia) // *Marine Geophysical Researches*. 2001. V. 22. P. 445–464.
- 4) Croudace I. W., Rothwell R. G. Micro-XRF Studies of Sediment Cores // *Developments in Paleoenvironmental Research*. 2015. V. 17. 668 p.

ПОЛУЧЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СКОРОСТНОЙ МОДЕЛИ РАЙОНА ДЕЛЬТЫ РЕКИ ЛЕНЫ

Новиков М.А., Крылов А.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: сейсмология, сейсмотомография, землетрясения, река Лена, скоростная модель

Лаптевоморский регион важен для понимания современных тектонических процессов, так как расположен на стыке древней Сибирской платформы с молодыми структурами шельфа, которые испытывают в настоящее время напряжения растяжения. При этом, дельта Лены является одним из ключевых районов Лаптевоморского региона с точки зрения тектоники и сейсмологии, так как располагается на стыке нескольких сейсмических поясов. При этом, в дельте Лены располагается п. Тикси, который является важным транспортно-логистическим и научным центром региона. Целью настоящей работы является получение трехмерной скоростной модели земной коры в районе дельты реки Лены, что необходимо для корректного районирования сейсмической опасности. Для достижения поставленной цели, были решены следующие задачи:

- Обработка записей локальной сети сейсмостанций в дельте р. Лены, функционировавшей в 2016-2017 гг.
- Создание трехмерной скоростной модели дельты р. Лены методом пассивной сейсмотомографии
- Анализ трехмерной модели и сопоставление результатов с данными геологических и геофизических исследований

Для исследования были выбраны данные, полученные в рамках российско-германского проекта SIOLA. В ходе данного проекта в период с 2016 по 2020 гг. был выполнен ряд временных постановок сейсмостанций в дельте р. Лена. Для выполнения пассивной сейсмотомографии были использованы только записи сезона 2016-2017 гг., в ходе которого функционировала локальная сеть из 12 сейсмостанций. Каждая станция была оснащена сейсмическим регистратором DATA-CUBE, сейсмометрами MARK L4 1Hz и элементом питания. Все станции проработали штатно в течении девяти месяцев [1].

Сигналы от локальных землетрясений были найдены на записях при помощи алгоритма автоматического детектирования. Вступления Р и S-волн были определены вручную при помощи графического интерфейса программы SEISAN. Для дальнейшего анализа было отобрано 632 наиболее качественно записанных локальных землетрясения.

Для создания трехмерной скоростной модели был использован алгоритм пассивной сейсмотомографии LOTOS [2]. В качестве входных данных для программы LOTOS используются координаты станций и времена вступлений Р и S волн на записях этих станций. Кроме того, необходимо указать исходную одномерную скоростную модель среды, полученную из априорной информации. В рамках настоящего проекта использовались две начальные скоростные модели: IASP91 и скоростная модель, оцифрованная с профиля, полученного в рамках глубинного сейсмического зондирования «ШПАТ». При использовании обеих скоростных моделей в рамках данного исследования получились сходные результаты.

В полученной трехмерной скоростной модели наблюдается локальное увеличение показателя V_p/V_s в центре дельты, и постепенное его уменьшение при движении на юго-запад, в сторону Сибирской платформы. Результаты исследования согласуются с результатами пассивной томографии, выполненной с помощью сейсмических записей сезона 2019-2020 г., полученных в ходе постановки сейсмостанций в другой конфигурации, где наблюдаются локальные увеличения па-

раметра V_p/V_s в западной и центральной части дельты, а также уменьшения этого параметра в южной части [3].

Уменьшение V_p/V_s за счет положительной аномалии V_s связывают с наличием плотных консолидированных пород [4]. Кроме того, по современным гравиметрическим исследованиям в центре дельты наблюдается ярко выраженный локальный максимум положительной гравитационной аномалии [5]. В некоторых работах показано, что высокие значения V_p/V_s указывают на анизотропные свойства коры в разломных зонах, и являются также индикаторами насыщения трещиноватой среды флюидами [6]. Помимо этого, данная область характеризуется компрессионным тектоническим режимом и сосредоточением наиболее сильных землетрясений магнитудой до 5. Таким образом, найденная аномалия V_p/V_s может быть интерпретирована как район сосредоточения интенсивных сжимающих напряжений и наиболее выраженной трещиноватости в зоне нескольких пересекающихся активных разломов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-17-00125.

Список литературы

- 1) Гайсслер В.Х., Баранов Б.В., Шибяев С.В., Хаберланд К., Цуканов Н.В., Дозорова К.А. Российско-германский проект «Сейсмичность и неотектоника Лаптевоморского региона» // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, Вып. 37. № 1. 2018. С. 102-106
- 2) Koulakov, I.Yu. LOTOS Code for Local Earthquake Tomographic Inversion: Benchmarks for Testing Tomographic Algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. 99 (1). 2009. P. 194–214
- 3) Dobretsov N.L., Simonov V.A., Koulakov I.Yu., Kotlyarov A.V. Migration of fluids and melts in subduction zones and general aspects of thermophysical modeling in geology // Russ. Geol. Geophys. 58 (5). 2017. P. 571–585
- 4) Дергач П.А., Епонешникова Л.Ю., Понасенко С.Н., Картозия А.А., Гайсслер В.Х., Дучков А.А., Шибяев С.В., Зобнин Г.Ю. Построение сейсмотомографической модели района научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» по данным локального сейсмологического мониторинга за 2019–2021 гг. // Геодинамика и тектонофизика. 13(2):0627. 2022. С. 1-6
- 5) Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сеймотектоническая активизация новейших структур дельты р. Лена // Геотектоника. №5. 2019. С. 62-77
- 6) Wang X.Q., Schubnel A., Fortin, J., David E.C., Guéguen Y., Ge H.K. High V_p/V_s ratio: Saturated cracks or anisotropy effects? // Geophys. Res. Lett. Vol. 39(11). 2012. P. 4

КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Прушковская И.А.¹, Обрезкова М.С.¹, Гусев Е.А.²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

² ФГБУ "ВНИИОкеангеология", г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: диатомовые водоросли, поверхностные осадки, Восточно-Сибирское море, количественное распределение.

В последнее время окраинные моря Северного Ледовитого океана находятся под воздействием различных природных и антропогенных факторов, влияющих на их экологическое состояние. Использование комплексных методов (литологических, микропалеонтологических и др.) для изучения этих морей необходимо для реконструкции истории их геологического прошлого, палеоокеанографических реконструкций и установления степени влияния природных и антропогенных факторов на их современное состояние.

Диатомовые водоросли – одна из наиболее приоритетных групп микрофоссилий, широко используемых в палеогеографических исследованиях. Интерес к ним обусловлен, прежде всего, их обилием и хорошей сохранностью в донных отложениях. В то же время диатомеи обладают четко выраженной реакцией на экологические изменения природной среды, что позволяет использовать их для реконструкции палеогеографических условий [1].

Целью настоящей работы было изучение распространения диатомовых водорослей в поверхностных осадках одного из наиболее труднодоступных районов Российской Арктики – центральной части Восточно-Сибирского моря. Материал для исследования получен сотрудниками "ВНИИОкеангеология" во время рейса НИС «Михаил Сомов» в 2020 г.

В изученном районе Восточно-Сибирского моря содержание диатомей низкое, отмечается значительное изменение концентрации диатомей (от 30 до 300 тыс. ств./г. осадка), с тенденцией к увеличению с запада на восток. Аналогичная динамика наблюдается и в распределении первичной продукции фитопланктона, оцененной по уровню хлорофилла, измеренного с использованием спутниковых данных [2]. Также подобные тенденции выявлены в структуре танатоценозов диатомей в поверхностном слое донных отложений [1; 3; 4]. Западная и восточная части моря имеют различные характеристики в пространственном распределении и составе взвеси. В Восточно-Сибирском море два основных источника поступления материала в донные осадки – это взвешенные частицы речного стока и комплекс ледовых отложений позднеплейстоценового периода термоабразионного побережья. Последний компонент преобладает в западной части ВСМ, что, в свою очередь, формирует основной резерв материала, участвующего в процессах осадкообразования [5]. Таким образом, значительное количество терригенного материала, поступающего в морские осадки с речным стоком и вследствие термической и волновой абразии берегов, приводит к "разбавлению" биогенной составляющей осадка. Минимальная концентрация диатомей в отложениях отмечена на северных станциях, в направлении к востоку от Колымы наблюдается последовательное увеличение содержания диатомей. Полученные результаты будут использованы в наших будущих исследованиях кернов отложений этого региона для оценки влияния климатических изменений на биоту в прошлом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00107, <https://rscf.ru/project/24-27-00107/>

Список литературы

- 1) Полякова Е.И. Арктические моря Евразии в позднем кайнозое. М.: Научный мир, 1997. 146 с.
- 2) Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
- 3) Обрезкова М.С., Колесник А.Н., Семилетов И.П. Особенности распределения диатомей в поверхностных осадках морей Восточной Арктики России (на основе кластерного анализа) // Биология моря, 2014, том 40, № 6, с. 473-480.
- 4) Obrezkova M.S., Tsoy I.B., Kolyada A.E., Shi X., Liu Y. Distribution of Diatoms in the Surface Sediments of the Seas of Eastern Siberia and the Arctic Ocean Distribution of diatoms in seafloor surface sediments of the Laptev, East Siberian, and Chukchi seas: implication for environmental reconstructions // Polar Biology. 2023. 46:21-34. <https://doi.org/10.1007/s00300-022-03105-5>
- 5) Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Мазуров А.К., Семилетов И.П. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ. 2016. 192 с.

ВЛИЯНИЕ РАЗГРУЗКИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ ФЛЮИДОВ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОСАДКОВ

Рубан А.С.¹, Дударев О.В.²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет

²Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН

Ключевые слова: метановые сипы, гранулометрический состав, донные осадки, море Лаптевых.

Гранулометрический состав донных осадков терригенного происхождения зависит от многих факторов, включая источники осадочного материала, гидродинамические условия, рельеф дна бассейна седиментации и пр. [1]. В связи с этим результаты гранулометрического анализа часто применяется для выявления областей сноса, направленности осадочных процессов и условий седиментации [2]. Предыдущие исследования показывают, что донные осадки внешнего шельфа моря Лаптевых представлены в основном их мелкозернистыми типами [3]. Первое сообщение о распространении песчаных осадков в этом районе было сделано Кошелевой В.А и Яшиным Д.С. [4], однако, факторы, контролирующие накопление грубозернистого материала, не были изучены. В последующих исследованиях было предложено несколько гипотез, объясняющих азональное распределение литологических типов донных осадков [5], включая (i) экзарацию морского дна айсбергами, (ii) влияние придонных течений, (iii) разгрузку метансодержащих флюидов (iv) ледовый перенос. В данной работе представлены результаты изучения гранулометрического состава донных осадков (короткие керны длиной до 18 см), отобранных в различных частях шельфа моря Лаптевых. Керны АМК-6027 и АМК-6948 были отобраны на участках с зарегистрированной флюидной разгрузкой, тогда как керны АМК-6053 и АМК-6981 получены на станциях, где в настоящее время просачивание флюидов не обнаружено.

В фоновых осадках содержание пелита варьирует в пределах от 15,4 % до 27,1 %, а алеврита - от 72,9 % до 84,6 %. Песок наблюдался только в двух пробах керна АМК-6981, где его содержание не превышало 1 %. В донных осадках подверженных просачиванию флюидов содержание пелита, алеврита и песка изменяется в диапазонах 8,00-22,2%, 52,3-85,1% и 0,0-39,7% соответственно. Относительно высокое содержание песка выявлено в двух образцах керна АМК-6948 – интервалы 3-4 см (39,7 %) и 8-9 см (21,7 %). Тот факт, что песок обнаружен в тонких (<1 см) прослоях, может свидетельствовать об эпизодическом влиянии факторов, контролирующих накопление грубых фракций. Ранее сообщалось о двух полях метановых сипов, расположенных на внешнем шельфе моря Лаптевых [6]. Интересно, что песчаные отложения, описанные другими исследователями, были обнаружены именно в этих двух полях. Мигрирующие вверх флюиды могут перерабатывать гранулометрический состав осадочной толщи, ремобилизуя и вымывая более мелкие фракции (алеврит и пелит) и концентрируя относительно малоподвижные крупные частицы (песок). Дударев О.В. [5] отмечал повышенную концентрацию взвеси в придонной толще воды на участках флюидной разгрузки, что подтверждает возможность вымывания тонкодисперсных частиц. Таким образом, мы предполагаем, что восходящий газонасыщенный флюид способствовал накопления грубозернистого материала. Такие тонкие прослои грубозернистых осадков могут быть использованы для идентификации просачивания флюидов при реконструкции условий осадконакопления как в современных, так и в древних бассейнах, в дополнение к минералогическим и геохимическим данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-10002).

Список литературы

- 1) Zhong Y., Chen Z., Li L., Liu J., Li G., Zheng X., Wang S., Mo A. Bottom Water Hydrodynamic Provinces and transport patterns of the northern South China Sea: evidence from grain size of the terrigenous sediments // *Continental Shelf Research*. 2017. 140. P. 11–26.
- 2) Cai M.H., Lin J., Hong Q.Q., Wang Y., Cai M.G. Content and distribution of trace metals in surface sediments from the Northern Bering Sea, Chukchi Sea and Adjacent Arctic Areas // *Marine Pollution Bulletin*. 2011. 63. P. 523–527
- 3) Stein R., Fahl K. The Laptev Sea: distribution, sources, variability and burial of organic carbon // Berlin: Springer Verlag. 2004. P. 213-238.
- 4) Кошелева В.А., Яшин Д.С. Донные осадки арктических морей России // ред. И.С. Грамберг. СПб. 1999. 286 с.
- 5) Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., Мазуров А.К., Семилетов И.П. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России // монография. Томск : Изд-во Томского политехнического университета. 2016. 192 с.
- 6) Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L., Yusupov V., Salyuk A., Salomatin A., Chernykh D., Kosmach D., Panteleev G. et al. The East Siberian Arctic Shelf: Towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2015. 373. 20140451.

РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОЕ СКАНИРОВАНИЕ В СИСТЕМЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА КЕРНОВ МОРСКИХ ОСАДКОВ (НА ПРИМЕРЕ МАТЕРИАЛА ИЗ ЮЗ ЧАСТИ ЧУКОТСКОГО МОРЯ)

Селютин С.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: рентгенофлуоресцентное сканирование, керны морских осадков, геохимия, Чукотское море, отношение Fe/Rb

Керны морских осадков, в том числе их химический состав, – важный источник информации об истории седиментации и изменениях окружающей среды [1].

Основой для работы послужили 19 кернов осадков. Материал отобран с помощью грунтовой трубки в ЮЗ части Чукотского моря (95-й рейс НИС «Академик М.А. Лаврентьев», 2021 г.). Длина кернов не превышала 4.5 м. Это существенно меньше мощности осадочной толщи, накопленной в ЮЗ части Чукотского моря в голоценовое время [2], то есть рассматриваемые осадки однозначно голоценовые. Они сложены однотипным материалом. В основном это пелитовый алевроит или алевроитовый пелит. Консистенция от мягкой в верхней части кернов до более плотной в нижней. Цвет серый или оливково-серый с черными пятнами гидротроилита. Присутствуют следы биотурбации, фрагменты и детрит раковин моллюсков.

Анализ химического состава осадков выполнен в продольных распилах кернов методом рентгенофлуоресцентного сканирования [3] с помощью спектрометра Olympus Vanta (США). Анализ носил экспрессный характер, осадки находились в естественном ненарушенном состоянии. Содержание всех элементов нормировалось на содержание Rb. Это позволяло устранить погрешности, связанные с разной влажностью осадков, и сгладить различия в химическом составе осадков, обусловленные дифференциацией осадочного вещества при его осаждении на морское дно [4].

Из всех химических элементов, которые были определены при рентгенофлуоресцентном сканировании, контрастное распределение в кернах осадков показали Fe, Mn и Ti. Первые два элемента относятся к редокс-чувствительным, последний – к геохимически инертным. Значения Fe/Rb изменялись в пределах 163,64–849,57 при среднем 423,53. Для Mn/Rb и Ti/Rb это было соответственно 1,15–9,38 при среднем 3,28 и 5,45–96,07 при среднем 34,76. Основная масса значений для геохимических отношений Fe/Rb, Mn/Rb и Ti/Rb сосредоточилась вблизи среднего. Полученные данные обрабатывались с помощью методов математической статистики. Анализ частотного распределения значений с построением гистограмм показал, что ближе всего к нормальному распределению Ti/Rb, в случае с Fe/Rb и Mn/Rb имеет место отчетливая положительная асимметрия. Это связано с тем, что практически во всех кернах осадков есть интервалы с содержанием Fe и Mn, которое существенно отличается от средних значений. Полученные геохимические данные в целом согласуются с ранее опубликованными данными по ЮЗ части Чукотского моря [2, 5].

Проведенная работа показала, что рентгенофлуоресцентный анализ (сканирование) за счет своей экспрессности, с одной стороны, и относительно низкой чувствительности – с другой, может быть действенным инструментом на этапе предварительного изучения большого количества кернов осадков, отобранных в морской экспедиции, и их предварительного сопоставления с детально изученными кернами региона, а также для оперативного и аргументированного выбора среди уже отсканированных кернов тех, которые интересны для дальнейшего комплексного изучения. На примере данных, полученных при рентгенофлуоресцентном сканировании кернов осадков ЮЗ части Чукотского моря, показано, что на этапе предварительного изучения осадков арктического шельфа следует ориентироваться прежде всего на Fe (отношение Fe/Rb). В отличие от остальных элементов, определяемых рентгенофлуоресцентным спектрометром, Fe демонстрирует по осадочному разрезу значительные перепады в содержании, которые достаточно хорошо фиксируются.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00469, <https://rscf.ru/project/22-27-00469/>.

Список литературы

- 1) Rothwell R.G., Rack F.R. New techniques in sediment core analysis: an introduction. In: Rothwell R.G. (ed.) New Techniques in Sediment Core Analysis. Geological Society, London, Special Publications, 2006. V. 267. P. 1–29.
- 2) Павлидис Ю.А. Обстановка осадконакопления в Чукотском море и фациально-седиментационные зоны его шельфа // Проблемы геоморфологии, литологии и литодинамики шельфа. М.: Наука, 1982.
- 3) Гуленко Т.А., Волков В.Г., Лопатников Е.А. Сканирующее устройство экспресс анализа кернов. Патент на полезную модель RU 197194 U1, 10.04.2020. Заявка № 2020101560 от 15.01.2020.
- 4) Астахов А.С., Калугин И.А., Ши С., Аксентов К.И., Дарьин А. В., Ху Л., Бабич В.В., Мельгунов М.С., Плотников В.В. Роль ледяного покрова в формировании химического состава донных осадков восточносибирского шельфа // Геохимия. 2021. Т. 66. № 6. С. 526–540.
- 5) Кошелева В.А., Яшин Д.В. Донные осадки Арктических морей России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1999. 286 с.

ОБСТАНОВКИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В МАНЫЧСКОЙ ДЕПРЕССИИ В КОНЦЕ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА

Семиколенных Д.В.¹, Панин А.В.²

¹ Университет Витватерсранда, г. Йоханнесбург

² Институт географии РАН, г. Москва

Ключевые слова: палеогеография, поздний плейстоцен, стратиграфия, литология, хвалынский сток.

В конце позднего плейстоцена вследствие значительного увеличения стока с Восточно-Европейской равнины [1] в Каспии начала развиваться самая полноводная и масштабная в неоплейстоценовой истории раннехвалынская трансгрессия Каспия [2]. По достижении водораздела с Понтом воды Каспия стали сбрасываться в Манычскую депрессию и далее в Азово-Черноморский бассейн в период около ~18–14 тыс. л. н. [3]. Среди исследователей распространено мнение [4, 5, 6], что функционирование, открывшегося в Азово-Черноморский бассейн раннехвалынского пролива, проходило в два этапа: первый этап был эрозионным, при котором окончательно сформировался эрозионно-рядовой рельеф Манычской депрессии, а второй — аккумулятивный, во время которого отложились наблюдаемые в современных береговых обнажениях оз. Маныч-Гудило раннехвалынские осадки.

В ходе полевых работ 2022–2023 гг. нами было пробурено 24 скважины на территории Манычской депрессии: 17 скважин пробурено в створах п. Зунда Толга — балка Голубь, п. Маныч — оз. Б. Яшалтинское / х. Лиманный, по профилю через о. Левый; 8 скважин было пробурено в створах х. Сухой — х. Лиманский и п. Веселый — х. Спорный. Вскрытые скважинами отложения детально описаны, проведены гранулометрический и малакофаунистический анализы, что позволило составить схему обстановок осадконакопления в эпоху функционирования раннехвалынского пролива в пределах Манычской депрессии и сделать новые выводы относительно конфигурации и гидрологических характеристик существовавшего пролива.

Так, было установлено: 1) формирование вреза у водораздела Зунда Толга произошло задолго до открытия хвалынского стока; 2) большая часть о. Левый — останец раннехвалынской террасы, сохранившийся благодаря нахождению «в тени» более водоупорных и древних осадков; 3) в позднем плейстоцене хвалынский сток открывался в Манычскую депрессию единожды и существовал около 18–14 тыс. лет назад (по данным ОСЛ и АМС-датирования); 4) хвалынский сток сформировал обширные террасы в районе Чограйского водохранилища и оз. Маныч, однако в наиболее широкой части депрессии — в районе оз. Маныч-Гудило — русло стока тяготело к её южному борту, затем в районе х. Сухого поток сформировал садковский меандр и выработал глубокий врез в районе створа Веселовского водохранилища, чему способствовал низкий уровень Черного моря в эпоху пост-LGM (МИС 2 — вторая половина валдайского ледниковья); 5) следов голоценового (позднехвалынского) стока в пределах Манычской депрессии обнаружено не было.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ 22–17–00259.

Список литературы

- 1) Panin A., Grzegorz A., Buylaert J.-P., Matlakhova E., Moska P., Novenko E. Two Late Pleistocene climate-driven incision/aggradation rhythms in the middle Dnieper River basin, west-central Russian Plain // *Quaternary Science Reviews*. 2017. Vol. 166. P. 266–288.
- 2) Kurbanov R.N, Murray A.S., Thompson W., Svistunov M.I, Taratunina N.A, Yanina T.A. First reliable chronology for the Early Khvalynian Caspian Sea transgression in the Lower Volga River valley // *Boreas*. 2021. Vol. 50. No 1. P. 134–146.

- 3) Семиколенных Д.В., Курбанов Р.Н., Янина Т.А. Возраст хвалынского пролива в позднеплейстоценовой истории Манычской депрессии // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2022. №5. С. 103–112.
- 4) Федоров П.В. Плейстоцен Понто-Каспия. М.: Наука, 1978. 165 с.
- 5) Попов Г.И. Плейстоцен Черноморско-Каспийских проливов. М.: Наука, 1983. 216 с.
- 6) Янина Т.А. Неоплейстоцен Понто-Каспия: биостратиграфия, палеогеография, корреляция. М: Геогр. факультет МГУ, 2012. 264 с.

СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОКРАИНЫ ЗЕМЛИ МЭРИ БЭРД, ЗАПАДНАЯ АНТАРКТИКА

Сергеева В.М., Лейченко Г.Л.

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: Тихоокеанский сектор Антарктики, море Росса, моря Амундсена, континентальная окраина, океаническая кора, океанический спрединг, сейсмостратиграфия, осадочный чехол

Представлены предварительные результаты полевых геофизических (сейсмических, магнитометрических и гравиметрических) исследований, выполненных в рамках 69 Российской антарктической экспедиции на НИС «Академик Александр Карпинский» в тихоокеанском секторе Антарктики между морями Амундсена и Росса (110 – 170 з.д.). Сейсмические исследования МОВ ОГТ проводилась сейсмическим комплексом DigiSTREAMER 2D с длиной приёмной расстановки 6000 м. Района исследований включает в себя континентальную окраину Земли Мэри Бэрд и глубоководную океаническую котловину, которые развивались в результате растяжения земной коры и отделения Новозеландского блока и плато Кэмпбелл [1] от Антарктиды в позднемеловое время. Мощность осадочного чехла меняется от 5 км в подножии континентального склона до 1 км в абиссальной котловине. Представления о структуре осадочного чехла основаны, главным образом, на данных сейсмических профилей экспедиций Германии 2010 г и России 2018 г.

В результате предшествующих экспедиций [1] в районе исследований выявлены линейные магнитные аномалии кампан-эоценового возраста (73-44 млн лет назад), которые расположены параллельно континентальной окраине и имеют значительные смещения по трансформным разломам. Скорости спрединга между хронами полярности C33y–C31o составляют 2,7 см/год, увеличиваясь до 3,1 см/год между C31o–C28o и затем замедляясь до 2,3 см/год между C28o и C24.1 и 0,4–1,7 см/год между C24.1–C20.

Осадочный чехол глубоководного осадочного бассейна состоит из рифтовых и пострифтовых осадочных комплексов. Основную часть комплексов составляют осадки гемипелагического, пелагического и турбидитного происхождения. Согласно ранее предложенной сейсмостратиграфической модели [2], в осадочном чехле выделяются различные сейсмические горизонты от AS1 до AS6 (от древнего к молодому, соответственно), которые маркируют главные фазы оледенения антарктического континента. Осадочный чехол делится на доледниковую, раннюю ледниковую и основную ледниковую толщи. Доледниковая часть разреза представлена верхнемеловыми-эоценовыми комплексами мощностью до 800 м, ранняя синледниковая – олигоценowymi-среднемиоценовыми комплексами мощностью до 700 м; основная синледниковая – среднемиоценовыми-плейстоценовыми комплексами мощностью 600–1000 м. В осадочном чехле на разных стратиграфических уровнях проявлены сейсмические фации с различной геометрией внутренних отражений и характерными особенностями внешней морфологии, образованные под влиянием склоновых гравитационных потоков и/или придонных контурных течений. Возраст горизонтов в сейсмостратиграфической модели устанавливается на основе данных о возрасте океанического фундамента и сопоставления с данными бурения в морях Росса и Амундсена.

нет

Список литературы

- 1) Wobbe F., Gohl K., Chambord A., Sutherland R. Structure and breakup history of the rifted margin of West Antarctica in relation to Cretaceous separation from Zealandia and Bellingshausen plate motion, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2012. Vol. 13. Q04W12.

- 2) Lindeque A., Gohl K., Henrys S., Wobbe F., Davy B. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016. Vol. 443. P. 183–202.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ФИЛЬТРОГЕННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ БЕРИНГОВА МОРЯ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ-РОБОТА ДЛЯ CSMHYD HYDOFF

Смирнов Ю.Ю., Матвеева Т.В., Щур А.А., Чазов А.О.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга»

Ключевые слова: газовые гидраты, Python, зона стабильности газовых гидратов

Данная работа является продолжением представленной ранее на конференции КИМО-2023 [1] и посвящена моделированию фильтрогенной зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) Берингова моря. Цель данной работы представить подход к моделированию и картированию ЗСГГ фильтрогенного генезиса, применяемый во ФГБУ «ВНИИОкеангеология» на примере Берингова моря, а также связанное с ним решение для проблемы геотермического районирования с усвоением данных МОВ ОГТ, и, что является не менее значимым, представить собственную реализацию программного обеспечения для автоматизации расчета фильтрогенной ЗСГГ.

Методика моделирования ЗСГГ фильтрогенного типа заключается в последовательном решении задач: 1) выборе равновесной кривой гидратообразования и ее имплементации в расчетный алгоритм, 2) выборе расчетных сеток батиметрии, геотермического градиента, придонной температуры воды и солености и их синтезе в объединенном массиве данных (ОМ) для дальнейшего расчета кривых температуры в системе морское дно-отложения, 3) вычисление мощности ЗСГГ по пересечению равновесной кривой и «реального» - вычисленного профиля температуры в отложениях для каждого узла сетки картирования.

В качестве равновесных кривых гидратообразования, мы использовали кривые построенные средствами CSMHyd Hydoff [2], с помощью оригинального алгоритма GHSZ_VNIO [1] – программы-бота на языке Python, позволяющей автоматизировать работу одномерной Hydoff и выполнять построения равновесных кривых в произвольном диапазоне температур, солености морской воды и состава газа и далее, проводить построение и сопоставление равновесных кривых с температурными профилями в отложениях, таким образом вычисляя мощность ЗСГГ в узлах расчетной сетки с произвольным набором параметров на входе.

Массив геотермической информации, использованный в ОМ, представляет из себя базу данных Global Heat Flow Database [3] с актуализацией по данным о залегании гидратобусловленной аномалии (BSR – bottom simulating reflector) по результатам интерпретации данных МОВ ОГТ в Беринговом море. На сейсмопрофилях были заданы точки для расчета геотермического градиента по данным о глубине BSR с шагом около 10 км, для чего была написана отдельная программа. В результате получен массив данных, содержащий географические координаты, глубину моря, и глубину залегания BSR в 303 точках на акватории Берингова моря в формате точечного шейп-файла. Температура на глубине BSR рассчитана по формуле равновесной кривой термобарических условий гидратообразования для 100% метана.

На основании полученных данных о температуре на глубине залегания BSR, были определены значения геотермического градиента в каждой точке как разница между температурой на глубине залегания BSR и температурой дна, деленная на глубину залегания BSR. Итоговый массив данных геотермического градиента содержит 419 точек. Значения термоградиента на акватории изменяются от 11,5 до 121,3 °С/км при среднем значении 60 °С/км.

ОМ был импортирован в программу GHSZ_VNIO, с помощью которого был произведен расчет фильтрогенной ЗСГГ для Берингова моря. Полученные значения мощности ЗСГГ интерполированы на всей акватории. В результате проведенного исследования на акватории Берингова моря средняя мощность ЗСГГ в пределах ИЭЗ достигает 272 метров.

Результаты моделирования ЗСГГ средствами робота GHSZ_VNIIO и Hydoff были проанализированы. Данные о положении кровли ЗСГГ в Беринговом море отсутствуют. Однако, мы можем сравнить рассчитанное роботом положение подошвы ЗСГГ (GH_{robot}) с положением подошвы ЗСГГ по данным BSR (GH_{BSR}). Всего из расчетной сети было извлечено порядка 302 тыс. станций, в которых расчетная ЗСГГ попадает на трассу с интерпретированным BSR. Как и ожидалось, коэффициент корреляции между GH_{robot} и GH_{BSR} составил 0.94, что является чрезвычайно высоким показателем. Относительная погрешность модельного расчета сгруппирована в области отклонений 10-15%, при этом число узлов стеки с погрешностью более 15% неуклонно снижается и становится крайне малым уже после 20%.

В работе представлен оригинальный подход к моделированию термобарической фильтрогенной ЗСГГ. Дано описание программы-надстройки над свободно распространяемым ПО Hydoff. Представлены результаты геотермического районирования Берингова моря с учетом данных интерпретации профилей МОВ ОГТ. Проведенный анализ полученных расчётным путем результатов демонстрирует высокую степень соответствия их данным сейсморазведки.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы

- 1) Smirnov, Y., Matveeva, T.V., Shchur, N.A., Shchur, A.A., Bochkarev, A.V. (2023). A CSM-Based Python Bot for Estimating the Stability Zone of Gas Hydrates. In: Chaplina, T. (eds) Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). CIWO 2023. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47851-2_39
- 2) Sloan E.D. Gas hydrates: review of physical/chemical properties // Energy & Fuels. 1998. Vol.12. No 2. P. 191–196
- 3) Fuchs. S., Norden B. The Global Heat Flow Database: Release 2021 // GFZ Data Services. International Heat Flow Commission. 2021. <https://doi.org/10.5880/figeo.2021.014>

ЭТАПЫ ПОСТУПЛЕНИЯ РЕЧНЫХ ВОД НА ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ШЕЛЬФ КАРСКОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ БЕНТОСНЫХ ФОРАМИНИФЕР

Смирнова К.М., Новичкова Е.А., Козина Н.В., Сломнюк С.В., Матуль А.Г., Кравчишина М.Д.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: палеоэкология, таксономическое разнообразие, статистический анализ, опреснение.

Арктический бассейн – регион, который активно исследуется учеными-геологами. В данной работе, посредством микропалеонтологического фораминиферового анализа, устанавливаются палеоэкологическая и палеоокеанологическая обстановки в районе юго-западной части шельфа Карского моря в голоцене.

Фораминиферы, важная часть зоопланктона, являются чувствительным индикатором окружающей среды. Группа бентосных фораминифер (БФ), которая обитает в различных зонах моря, от супралиторали до глубин абиссали, является особенно значимой для палеореконокструкций. Мы исследовали колонку АМК-7440, которая была отобрана трубкой большого диаметра (ТБД) во время 89-го рейса (1 этап) НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре 2022 года. Эта колонка была получена из юго-западной части Карского моря с глубины 99 м и вскрывает морских осадки мощностью 639 см. Нами изучено 63 образца донных осадков колонки с интервалом пробоотбора 10 см. Просмотр микрофоссилий производился под микроскопом Zeiss Stemi 508 с увеличением в 25х. Планктонные фораминиферы в изученных образцах встречены не были.

По результатам магнито- и спектрофотометрии керна, а также благодаря анализу литературных данных [1], предполагаемый возраст осадков колонки может составлять около 7–18 тыс. кал. лет.

Численность бентосных фораминифер достаточно сильно меняется по колонке. Первые данные по распределению и таксономическому разнообразию бентосных фораминифер в осадках юго-западной части шельфа Карского моря показали, что в осадках колонки АМК-7440 их ассоциация представлена 28 видами. Доминирующими видами являются: *Cassidulina reniforme* и *Elphidium clavatum*.

Вид *Cassidulina reniforme* является типичным арктическим представителем группы БФ, ассоциированным в Карском море с холодными и распресненными арктическими водами. Кроме того, данный вид характерен для зоны дрейфующих льдов, особенно при совместном нахождении в осадках вместе с видом *Elphidium clavatum*. В редких случаях *C. reniforme* указывает на периодические бескислородные условия на морском дне [2]. В исследуемой колонке концентрации *C. reniforme* достигают 35 экз./г., в то время как его доля в ассоциации БФ доходит до 48%.

Второй по значимости доминирующий вид *Elphidium clavatum* – оппортунистический вид, встречающийся практически повсеместно и часто достигающий высокой численности в стрессовых обстановках с ярко выраженной сезонностью в поступлении питательных веществ, например, в зонах контакта речных и морских вод [2, 3]. Его содержание в составе ассоциации БФ доходит до 48%, как и у *C. reniforme*, однако его концентрации в осадках колонки достигают 66 экз./г.

Для 39 образцов были получены результаты изотопно-кислородного и изотопно-углеродного анализа по раковинам БФ *Elphidium clavatum*, по которым возможно реконструировать этапы поступления пресных вод в Карское море.

Подготовка, обработка проб и микропалеонтологический анализ выполнен по проекту РНФ № 21-17-00235.

Список литературы

- 1) Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (paleo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // *Quaternary Science Reviews*. 2004. № 23. P. 1485–1511.
- 2) Murray J. *Ecology and applications of benthic foraminifera*. // Cambridge University Press: Cambridge. 2006.
- 3) Hald M., Korsun S. Distribution of modern benthic foraminifera from fjords of Svalbard, European Arctic // *Journal of Foraminiferal Research*. 1997. № 27. P.101–122.

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ВАЛДАЙСКОГО ОЛЕДЕНЕНИЯ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Соловьева М.А.¹, Монтелли А.И.², Рыбалко А.Е.³, Репкина Т.Ю.¹, Аксёнов А.О.³,
Щербакова Е.В.¹, Росляков А.Г.¹, Терёхина Я.Е.¹, Колюбакин А.А.⁴, Токарев М.Ю.¹,
Ахманов Г.Г.¹

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Университетский колледж Лондона, г. Лондон

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

⁴ООО «РН-Эксплорейшн», г. Москва

Ключевые слова: Баренцево море, многолучевое эхолотирование, сейсморазведка, ледниковые формы рельефа, Валдайское оледенение, палеогеографические реконструкции.

Наиболее острой проблемой в истории четвертичного развития Баренцевоморско-Карского шельфа является вопрос о масштабах покровного оледенения в этом регионе. Придерживаясь распространённой гипотезы о полном оледенении шельфа Баренцева моря (e.g. [1]), мы ищем её подтверждения в различных формах рельефа дна, которые могли быть сформированы при движении ледовых масс или талых вод, а также в специфических отложениях ледникового генезиса. Сложность подобных исследований заключается в малом количестве открытой геолого-геофизической информации на Арктическом шельфе. В данной работе приводится результат интерпретации наиболее представительной базы данных 2D/3D сейсморазведки, материалов инженерно-геофизических съёмок и пробоотбора в российском секторе Баренцева моря, собранной в рамках амбициозного проекта ПАО «НК «Роснефть» и двух международных экспедиций Плавучего Университета (TTR-19 и TTR-20), организованных геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

Собранная база данных практически полностью охватывает российскую часть Баренцева моря, но большинство сейсмопрофилей низкочастотные, что накладывает ограничения на изучение приповерхностного интервала разреза [2]. Это потребовало переобработки некоторых ключевых профилей по специальному графу, нацеленному на сохранение информации о верхней части разреза [3], являющейся важнейшей для реконструкции оледенений.

В результате анализа материалов на значительной части территории Баренцева моря была прослежена граница мезозойско-кайнозойского несогласия (URU – Upper Regional Unconformity), отделяющая коренные отложения от рыхлого покрова, представленного преимущественно четвертичными отложениями ледникового, ледниково-морского и морского генезиса. Четвертичные отложения характеризуются практически повсеместным распространением в регионе, однако их мощность крайне не выдержана и варьирует от первых сантиметров до ~200 м. Важным результатом работы стало создание карты мощностей четвертичных отложений для восточной части Баренцева моря, которая местами существенно уточняет предыдущие схемы (e.g. [4]).

Установлено, что в северной части Баренцевоморского шельфа мощность голоценовых морских осадков существенно редуцирована или они совсем отсутствуют. Это обеспечивает хорошую выраженность ледниковых форм в современном рельефе. Анализ их распространения и ориентации позволяет понять особенности движения палео-ледниковых потоков: скорость, направление и положение фронта. Наиболее распространёнными формами гляциального рельефа, позволяющими определить направление течения ледниковых потоков, являются мегамасштабная ледниковая линейность, туннельные долины и озы, друмлины, гляциотектонические пары. Положение фронта ледника в момент его максимального распространения и дегляциации маркируют такие формы рельефа, как конечные морены, призмы отлегания, морены де Гира и моренные гряды иного

генезиса. Также были обнаружены формы рельефа, сформированные непосредственно после отступления ледника: кратеры гидратного взрыва, борозды айсбергового выпахивания.

Формы ледникового рельефа закартированы на всей территории Баренцевоморского шельфа. Анализ распространения и ориентации ледниковых структур может свидетельствовать о существовании нескольких локальных ледовых куполов в пределах шельфа и на окружающей суше. Такие купола существовали на поднятии Персея [5], Северо-Восточном плато и на возвышенности к северо-востоку от о. Северный. В то же время, установлено, что предполагаемый ранее на седловине Страхова палео-ледниковый купол отсутствовал, а ледниковые потоки перетекали из желоба Седова в Восточно-Баренцевоморскую впадину [6]. Южнее, на Адмиралтейском валу, обнаружена серия краевых моренных гряд, что свидетельствует о поэтапном освобождении шельфа Баренцева моря от ледникового щита. Здесь же широко распространены приледниковые конуса выноса и призмы зоны отлегания, сформировавшиеся в местах, где края шельфовых ледников всплывали, «отрываясь» от морского дна.

В южной части Баренцева моря, а также в Печорском море, ледниковые формы хуже выражены в современном рельефе дна, что существенно затрудняет детальную реконструкцию оледенения. Однако картирование краевых ледниковых гряд в Печорском море позволило уточнить юго-восточную границу максимального распространения валдайского оледенения. Мы отрисовали её южнее, чем предполагалось предыдущими реконструкциями (e.g. [1]).

Выполненный комплексный анализ материалов существенно расширил представления об истории развития региона во время четвертичного оледенения.

Работа выполнена в рамках проекта ПАО «НК «Роснефть» (Договор №С710121/0046Д/05-202) с привлечением опубликованных материалов экспедиций «Обучение-через-исследования» (ТТР) Плавучего Университета ЮНЕСКО-МГУ.

Список литературы

- 1) Hughes A.L.C., Gyllencreutz R., Lohne Ø.S. et al. The last Eurasian ice sheets – a chronological database and time-slice reconstruction // *Boreas*. 2016. Vol. 45. P. 1-45.
- 2) Колюбакин А.А., Губарева О.А., Терехина Я.Е. и др. Подходы к сейсмостратиграфическому анализу для палеореконокструкций четвертичных геологических процессов на шельфе Баренцева моря // *Геофизика*. 2021. № 6. С. 104-110.
- 3) Terekhina Y.E., Gorbachev S.V., Maev P.A. et al. A Possibility of Using Standard 3D Seismic Data for Assessment of Drilling Geohazards in Transit Zone // *Near Surface Geoscience*. EAGE Publications. 2016. Vol. 2016. P. 1-5.
- 4) Костин Д.А., Тарасов Г.А. Четвертичный осадочный чехол Баренцево-Карского бассейна // *Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии*. 2011. Вып. 3. С. 107-130.
- 5) Montelli A., Solovyeva M., Akhmanov G. et al. The geomorphic record of marine-based ice dome decay: Final collapse of the Barents Sea ice sheet // *Quaternary Science Reviews*. 2023. Vol. 303, 107973.
- 6) Dowdeswell J., Montelli A., Akhmanov G. et al. Late Weichselian ice-sheet flow directions in the Russian northern Barents Sea from high-resolution imagery of submarine glacial landforms // *Geology*. 2021. Vol. 49. P. 1484-1488.

РЕДКИЕ ГАЗОГИДРАТОНОСНЫЕ СТРУКТУРЫ ТИПА "ПАГОДА" В БЕРИНГОВОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ МОВ ОГТ

Чазов А.О.^{1,2}, Матвеева Т.В.¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург*

Ключевые слова: Газовые гидраты, пагоды, МОВ ОГТ, сейсморазведка, BSR

Российская часть Берингова моря характеризуется широким распространением газовых гидратов. Основные газогидратообусловленные аномалии – BSR (англ. Bottom Simulating Reflector – отражающий горизонт, имитирующий дно) и VAMPs (англ. Velocity-Amplitude features – амплитудно-скоростные аномалии) были выявлены на многочисленных сейсмических разрезах разными авторами [1,2]. На сегодняшний день, в Беринговом море не был обнаружен третий и наиболее редкий признак газогидратоносности, структуры типа «пагода» (англ. Pagoda structures). Цель данной работы – обнаружить и охарактеризовать пагоды, как особую разновидность газогидратоносных структур в Беринговом море.

Пагоды – структуры куполообразной формы, которые встречаются в глубоководных отложениях. Впервые пагоды были обнаружены на континентальном склоне и абиссальной равнине у берегов Западной Африки [3], сейсмоакустические исследования на глубинах от 2000 до 5000 м позволили оконтурить обширные области распространения пагод, представленных чередующимися светлыми и темными треугольными сейсмическими структурами, которые, могут быть обусловлены локальными центрами образования газовых гидратов. Предполагается, что «потемнение» участков сейсмоакустических профилей может быть вызвано закупориванием пор гидратным цементом. На сегодняшний день пагоды были также обнаружены в Средиземном море и море Скоша [4,5]. На сейсмоакустических разрезах аномалии представлены вертикальными структурами высотой 100-200 м и шириной 200-1200 м. С пагодами ассоциированы деформации отложений и холмы высотой до десяти метров. Их образование связывается с вертикальной миграцией газонасыщенных флюидов в зону стабильности газовых гидратов.

В 2023 году авторами был проанализирован значительный объем геофизической информации АО «Дальморнефтегеофизика» и АО «Росгеология». На 3 региональных сейсмических профилях МОВ ОГТ 2D: BS18-002, BS18-006, BS18-012 на площади более 4,2 тыс. кв.км. при глубинах моря 3300-3500 м было обнаружено множество структур типа «пагода». Впервые пагоды были обнаружены на материалах низкочастотной сейсморазведки. Большая глубинность метода МОВ ОГТ позволила проследить нижнюю границу зоны стабильности газовых гидратов по горизонту BSR, выше которого наблюдается зона осветления. Пагоды представляют собой узкие вертикальные аномалии, и являются продолжением зоны осветления в верхнюю часть разреза. Верхняя кромка структур типа «пагода» прослеживается до поддонных глубин 30-300 м, в единичных случаях, до поверхности дна. Это отличает данную работу, поскольку использование данных именно МОВ ОГТ позволило проследить пагоды на глубину, выявить не достигающие придонной части разреза пагоды и обнаружить их связь с другими газогидратообусловленными аномалиями (BSR).

Ширина пагод варьирует от 100 до 1500 м, а высота от 30 до 300 м. На сейсмических разрезах пагоды – пример аномалий с хаотичной внутренней структурой и низким уровнем амплитуд сигнала, прерывающих корреляцию горизонтов осадочной слоистости. Вероятно, и осветление над BSR, и хаотичные отражения в пагодах вызваны минимальным контрастом акустического импеданса из-за цементации пор газовыми гидратами. На морском дне над пагодами развиты пологие положительные формы рельефа, высота которых достигает 10, иногда 100 м, а диаметр 2 км. От-

ложения над пагодами деформированы в незначительные по ширине и высоте антиклинальные складки, повторяющие положительные формы рельефа.

Осадки под зоной стабильности газовых гидратов газонасыщены, на сейсмических разрезах это выражается в хаотичной волновой картине и повышенных амплитудах отражений. Кроме того, ниже зоны стабильности наблюдаются узкие вертикальные аномалии типа «газовая труба» шириной до 3 км, маркирующие зоны вертикальной миграции флюидов. Важно отметить, что самые большие пагоды наблюдаются именно над газовыми трубами. Это может быть связано с тем, что газовые трубы маркируют ослабленные зоны или зоны повышенной проницаемости. Вероятно, ослабленные зоны достигают зоны стабильности газовых гидратов, где и происходит аккумуляция газовых гидратов в узких субвертикальных зонах.

В результате работ, в абиссальной части Берингова моря авторы выделили обширную область распространения газогидратоносных структур типа «пагода» на площади превышающей 4,2 тыс. кв.км. Кроме того, удалось выявить связь пагод с газовыми трубами, горизонтом BSR и зоной осветления над ним.

Работа выполнялась в 2023 году в рамках тематических работ ФГБУ «ВНИИОкеангеология» по количественной оценке ресурсов газовых гидратов в морях России.

Список литературы

- 1) Салтыкова Н. А., Соловьев В. А., Павленкин А. Д. Сейсморазведочные признаки субмаринных газовых гидратов в Беринговом море //Геолого геофизические исследования в Мировом океане. Л.: Севморгеология. – 1987. – С. 119-130.
- 2) Жигулев В. В., Савицкий А. В., Жигулев А. В. Изучение газогидратов Берингова моря с применением AVO-анализа //Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3. – №. 1. – С. 44-53.
- 3) Emery K. O. Pagoda structures in marine sediments //Natural gases in marine sediments. – Boston, MA : Springer US, 1974. – С. 309-317.
- 4) Somoza L. et al. Seafloor mounds, craters and depressions linked to seismic chimneys breaching fossilized diagenetic bottom simulating reflectors in the central and southern Scotia Sea, Antarctica //Global and Planetary Change. – 2014. – Т. 123. – С. 359-373.
- 5) Passaro S. et al. Seafloor doming driven by degassing processes unveils sprouting volcanism in coastal areas //Scientific Reports. – 2016. – Т. 6. – №. 1. – С. 22448.

УСЛОВИЯ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ ЮЖНОГО ЕВРАЗИЙСКОГО СКЛОНА ПОДВОДНОГО ХРЕБТА ЛОМОНОСОВА В ПОЗДНЕМ ПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ

Шабельникова С.К., Василенко Ю.П.

Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, г. Владивосток

Ключевые слова: Палеоокеанология, палеореконструкция, осадкообразование, хребет Ломоносова, Северный Ледовитый океан.

Высокоширотные природные системы являются особенно стрессонеустойчивыми. Последнее время происходят быстрые резкие изменения климата, которые особенно ярко отражаются в высокоширотных районах Арктики. Чтобы понять природные механизмы этих процессов имеющих на данный момент рядов наблюдений недостаточно, поэтому необходимо привлекать косвенные данные – такие палеоархивы, как керны донных осадков.

Такие палеоархивы предоставляют информацию о характере среды вне воздействия антропогенного фактора, позволяя реконструировать условия среды без антропогенной нагрузки. С их помощью можно правильно оценить реакцию природы Арктики на происходящие перемены для организации устойчивого природопользования.

Цель исследования заключалась в реконструкции условий окружающей среды южной части хребта Ломоносова в позднем плейстоцене-голоцене на основании изучения кернов донных осадков.

Материалами для данного доклада послужили два керна – восточный LV90-11-1 и западный LV90-24-1, которые были отобраны в ходе российско-китайской экспедиции в Северном Ледовитом океане в районе российского сектора южной части хребта Ломоносова, проводимой на борту НИС Академик М.А. Лаврентьев (рейс №90).

Для реконструкции окружающей среды нами были изучены гранулометрический анализ (ситовым методом и с помощью лазерного анализатора размера частиц Fritsch Analysette 22 было измерено 1109 проб), рентгенофлуоресцентный анализ (определение элементного состава), анализ плотности и влажности осадка, а также анализ содержания хлорина и общего органического углерода (измерение содержания хлорина осуществлялось на спектрофотометре, общее содержание углерода и неорганического углерода измеряли методом кулонометрии с использованием анализатора АН-7529).

На основании данных по магнитной восприимчивости, колориметрии, литостратиграфии, плотности, влажности, элементному составу и корреляции с надежной возрастной моделью керна PS2757-8, извлеченного на юго-восточном склоне хребта Ломоносова, были построены возрастные модели для изучаемых колонок донных отложений [1, 2, 3].

Гранулометрический состав рассматривается в данной работе на примере донных отложений двух кернов из восточного и западного склонов южной части хребта Ломоносова, в которых также рассмотрены содержание хлорина и общего органического углерода (ТОС). Восточный керн представлен пятью морскими изотопными стадиями (МИС), западный – четырьмя.

Рисунок изменения содержания хлорина между западным и восточными склонами отличается. Наиболее высокие значения концентрации хлорина – показателя первичной продуктивности, – в осадках западного склона отмечаются в серых слоях и приурочены к началу МИС 3 и МИС 1, тогда как для донных осадков восточного склона наиболее высокие концентрации хлорина отмечаются в коричневом слое второй половины МИС 1. Содержание общего органического углерода, отражающего общую продукцию, для осадков западного склона так же как и содержание хло-

рина максимально в серых слоях, но в отличие от него столь же высоки и в коричневом слое, относящемся ко второй половине МИС 1.

Наиболее высокие содержания ТОС, отражающего общую продукцию, и хлорина, характеризующего первичную продукцию, отмечаются в серых слоях ядра LV90-24-1. При этом, высокие содержания хлорина предполагают высокую продуктивность морского фитопланктона. Это свидетельствует о наличии в течение года малоледных/безледных сезонов, т.е. указывает на условия межледниковья. Таким образом, концентрации ТОС и хлорина предполагают накопления серых слоёв в условиях межледниковий, а столь высокие содержания ТОС сами по себе предполагают поступление дополнительной органики извне.

Западный склон юга евразийской части хребта Ломоносова получает значительно больше осадочного вещества, чем восточный, на что указывают данные гранулометрического анализа и скорость осадконакопления. Донные осадки ядра LV90-24-1 при мощности 557,5 см накопились за период около 66 тыс.лет, что соответствует средней скорости седиментации 8,4 см за 1000 лет. Тогда как донные отложения ядра LV90-11-1 практически равной мощности (551 см) накапливались в течение последних 100 тыс.лет, соответственно скорость их осадконакопления составила 5,5 см за 1000 лет.

Разницу в скоростях осадконакопления между склонами по всей видимости была связана со значительно большим удалением восточного склона от дельты р. Лена (в отличие от западного склона), а также прохождением Трансполярного дрефта вдоль западного склона хребта Ломоносова, который способствует распространению тонкого материала выноса р. Лены вдоль склона и способствует выносу морского припайного льда в сторону западного склона. Важно отметить, что положение Трансполярного дрефта может смещаться на восток, что может сказываться на путях поставки осадочного вещества, и как следствие приводить к увеличению поставки осадочного материала на восточный склон хребта Ломоносова.

Работа выполнена по гранту РФФИ (№ 22-17-00118).

Список литературы

- 1) Jakobsson M., Løvlie R., Arnold E.M., Backman J., Polyak L., Knutsen J.-O., Musatov E. Pleistocene stratigraphy and paleoenvironmental variation from Lomonosov Ridge sediments, central Arctic Ocean // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 1–22.
- 2) Löwemark L., März C., O'Regan M., Gyllencreutz R. Arctic Ocean Mn-stratigraphy: genesis, synthesis and inter-basin correlation // *Quaternary Science Reviews*. 2014. V. 92. P. 97–111.
- 3) West G., Alexanderson H., Jakobsson M., O'Regan M. Optically stimulated luminescence dating supports pre-Eemian age for glacial ice on the Lomonosov Ridge off the East Siberian continental shelf // *Quaternary Science Reviews*. 2021. V. 267. P. 107082.

СВЯЗЬ СОСТАВА СУЛЬФИДНОГО ОРУДЕНЕНИЯ С ХАРАКТЕРОМ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД: НА ПРИМЕРЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ ИРИНОВСКОЕ 1 И 2 (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ)

Яковенко Е.С.^{1,2}, Черкашёв Г.А.^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: современный океанский рудогенез, гидротермальные процессы, срединно-океанический хребет, внутренний океанический комплекс, рудный узел Ириновское.

Одним из ведущих факторов, определяющим состав океанского сульфидного оруденения, является характер вмещающих пород, внутри которых происходит гидротермальная циркуляция и формирование рудоносных флюидов. В свою очередь, породные комплексы определяются тектонической обстановкой, в которой они формируются. Так, для срединно-океанических хребтов характерны основные и ультраосновные породы, а для островодужных систем – магматические породы среднего и кислого состава. Эти различия отражаются в составе пространственно и генетически связанных с ними сульфидов. При сравнении состава оруденения Восточно-Тихоокеанского поднятия, на котором были сделаны первые открытия гидротермальных сульфидов, с открытыми позднее рудами островных дуг было отмечено обогащение последних свинцом, цинком, золотом и серебром [1].

В 1994 году в пределах медленно-спредингового Срединно-Атлантического хребта (САХ) было открыто первое рудное поле (Логачёв), связанное с породами габбро-перидотитового состава [2]. Руды поля Логачёв и других ассоциированных с ультраосновными породами рудных объектов, открытых позднее в Атлантическом и Индийском океанах, характеризовались повышенными по сравнению с «базальтовыми» полями содержаниями меди, цинка и кобальта [3].

В районе САХ имеются случаи, когда гидротермальные поля располагаются в непосредственной близости друг от друга, но в силу принадлежности к различным тектоно-магматическим комплексам отличаются по минеральному и химическому составу. Такая ситуация наблюдается, в частности, в пределах рудного узла Ириновское, расположенного в районе 13°20 с.ш. на западном борту рифтовой долины САХ и включающего два рудных поля.

Для сегмента САХ, расположенного в северной приэкваториальной зоне между трансформными разломами Зелёного мыса и Марафон, характерно широкое развитие внутренних океанических комплексов (ВОК), представляющих собой массивы верхнемантийных ультраосновных и нижнекорковых пород, выведенных на поверхность дна при тектоническом растяжении вдоль глубинных разломов (детачментов).

Данные эхолотирования и гидролокации бокового обзора в районе 13°20 с.ш., позволили оконтурить ВОК, выраженный в рельефе в виде куполообразной структуры протяжённостью 4 км и относительной высотой 1 км [4]. В результате донного пробоотбора в пределах этой структуры были подняты породы габбро-перидотитового состава, а также высокотемпературные гидротермальные сульфиды, скопление которых было оконтурено и названо рудным полем Ириновское-1 [5]. В 1.5 км к северо-западу было обнаружено другое рудное поле (Ириновское-2), расположенное вне структуры ВОК и связанное преимущественно с базальтами, но объединенное с первым полем в единый рудный узел. Второе поле опробовано в меньшей степени, поэтому сравнение этих двух рудных объектов носит предварительный характер. Дальнейшие исследования могут внести коррективы в заключение об их различиях, полученное в результате изучения минерального и химического состава сульфидных руд полей Ириновское-1 и 2.

Для руд поля Ириновское-1 определен преимущественно медный и медно-колчеданный состав, а для Ириновское-2 – серно-колчеданный. Минералы сульфидных руд поля Ириновское-1, изученные в аншлифах, представлены преимущественно халькопиритовым (18 шт.), реже марказитовым (2 шт.) и сфалеритовым (1 шт.) типами, а сульфидные руды поля Ириновское-2 - пирит-марказитовым (1 шт.) и халькопирит-пиритовым (1 шт.) типами. На поле Ириновское-2 также была отмечена прожилково-вкрапленная минерализация пиритового и халькопирит-пиритового состава в хлоритизированном базальте и в окварцованной брекчии с обломками базальта, соответственно.

Химический состав 20-ти проб массивных и прожилково-вкрапленных руд поля Ириновское-1 показывает повышенные содержания Cu, Zn, Se и Pb, а результаты анализа 4-х проб поля Ириновское-2 демонстрируют относительно более высокие концентрации Fe, Co и Ni.

Проведено сравнение полученных результатов с базой геохимических данных «ВНИИОкеангеология» по химическому составу руд САХ. Полученные результаты для рудного узла Ириновское в целом согласуются с базой данных, за исключением повышенных содержаний Co и Ni в прожилково-вкрапленных рудах поля Ириновское-2.

Таким образом, на материале по двум сульфидным рудным полям, приуроченным к породам основного (Ириновское-2) и ультраосновного (Ириновское-1) состава, отмечено различие в минеральном и химическом составе оруденения.

Дальнейшие исследования предполагают более детальное изучение состава вмещающих пород для выявления причин в составе оруденения, а также рассмотрения других параметров, определяющих его минералого-геохимические особенности.

Работа финансирована грантом Министерства образования и науки РФ № 075-15-2022-1220.

Список литературы

- 1) Petersen S. et al. News from the seabed—Geological characteristics and resource potential of deep-sea mineral resources // *Mar. Policy*. 70. 2016. P. 175–187
- 2) Batuev B., Krotov A., Markov V., Cherkashev G., Krasnov S., Lisitsyn E. Massive sulphide deposits discovered and sampled at 140 45'N, Mid-Atlantic Ridge // *BRIDGE Newsletter*. №6. 1994 . P. 6-10
- 3) Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J., Charlou J., Ondre'as H. et al. Geodiversity of Hydrothermal Processes Along the Mid-Atlantic Ridge and Ultramafic-Hosted Mineralization: A New Type of Oceanic Cu-Zn-Co-Au Volcanogenic Massive Sulfide Deposit // *Diversity of Hydrothermal Systems on Slow Spreading Ocean Ridges Geophysical Monograph Series 188*. 2010. P. 321-364
- 4) MacLeod C., Searle R., Murton B. et al. Life cycle of oceanic core complexes // *Earth and Planetary Science Letters*. Vol. 287. 2009. P. 333–344
- 5) Бельтнев В.Е., Иванов В.Н., Самоваров М.Л. и др. Геологическое изучение осевой зоны Срединно-Атлантического хребта с проведением опытно-методических работ по использованию новых методик полевых исследований // *Отчёт о результатах выполненных работ: библ. ФГУНПП «ПМГРЭ»*. г. Ломоносов. 2013 – 191 с.

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗАЛИВОВ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

Алексеева Н.К., Никулина А.Л., Блошкина Е.В., Рыжов И.В., Новихин А.Е., Махотин М.С.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт.

Ключевые слова: Западный Шпицберген, карбонатная система, буферная емкость, биогенные соединения

Фьорды Западного Шпицбергена расположены в зоне активного взаимодействия атлантических (теплые, соленые) и арктических (холодные, относительно пресные) вод. Район исследования включает в себя Исфьорд, являющийся одним из крупнейших фьордов в Арктике и вторым по длине на архипелаге Шпицберген, и Грэнфьорд — относительно небольшой фьорд, расположенный на южной стороне Исфьорда, недалеко от его горла. Для обоих фьордов выделяют 6 типов водных масс: поверхностные, промежуточные, трансформированные атлантические, атлантические, локальные и зимние [1]. Для исследования биогеохимических процессов во фьордах Западного Шпицбергена с целью оценки состояния морской экосистемы использовались данные, полученные по результатам зимних и летне-осенних съемок в 2021-2023 гг. Для этого в заливах Исфьорд и Грэнфьорд были выполнены совместные океанологические и гидрохимические работы: отбор проб морской воды на заданных горизонтах и анализ образцов в химико-аналитической лаборатории Российского научного центра на Шпицбергене (РНЦШ) для оценки следующих параметров: общей щелочности, рН, содержания биогенных соединений (силикаты, фосфаты и нитриты) согласно стандартным методикам и компонентов углеродного цикла, включая оценку параметров карбонатной системы. Формы углерода (органический и неорганический) определялись методом каталитического сжигания; содержание хлорофилла «а» — с использованием метода спектрофлуориметрии; компоненты карбонатной системы (равновесное парциальное давление углекислого газа $p\text{CO}_2$, гидрокарбонатный ион, карбонатный ион), степень насыщенности воды арагонитом Ω_{Ar} были рассчитаны в программе «Program Developed for CO₂ System calculations» [2].

Все опробованные образцы, в том числе в районе распространения зимней водной массы в заливе Биллефьорд во внутренней части Исфьорда, характеризовались насыщенностью кислородом более 100%. Содержание биогенных элементов контролировалось их потреблением фитопланктоном и характеризовалось подповерхностным минимумом в слое скачка, а также отображало влияние речных водных масс, поступающих в заливы. Дополнительное исследование вод шести рек, впадающих в залив Грэнфьорд, показало, что содержание фосфатов и нитритов находилось на уровне обнаружения методик, в то время как содержание силикатов в речном стоке находятся на порядок выше концентраций, характеризующих воды фьордов. Повышенное содержание нитритов в придонном слое Грэнфьорда указывало на процессы разложения органического вещества, поступившего в залив за летний период. Концентрации хлорофилла «а» в заливе Исфьорд варьируются от 0,064 до 0,9737 мкг/л, в заливе Грэнфьорд — от 0,630 до 11,170 мкг/л. Содержание фосфатов в летне-осенний периоды в заливе Грэнфьорд колеблется в довольно широком диапазоне от 3,5 до 58,5 мкг/л, в заливе Исфьорд — от 2,2 до 203 мкг/л. Диапазон концентраций кремния в заливе Исфьорд составляет 36,5–213 мкг/л, в заливе Грэнфьорд — 47,2–170 мкг/л; зимой концентрации кремния изменяются от 253 до 280 мкг/л (в заливе Исфьорд), содержание фосфатов — от 55 до 129 мкг (в заливе Грэнфьорд). В зимний период концентрации нитритов в заливе Исфьорд изменяются от 2 до 17 мкг/л, в заливе Грэнфьорд — от 2,5 до 19 мкг/л. Общая щелочность в заливах изменяется в пределах 1500-1970 мкмоль/дм³. Так, в заливе Исфьорд

средние значения общей щелочности в летне-осенний период составляют 1798 мкмоль/дм³, в заливе Грэнфьорд — 1831 мкмоль/дм³, в зимний период — 1640-1760 мкмоль/дм³. Такое изменение величины щелочности можно объяснить поступлением терригенного стока речных долин и ледникового стока, что способствует активному динамическому смешению морских и пресных вод в поверхностном слое заливов. Средние значения рН составляли 8,1 для обоих заливов. Парциальное давление углекислого газа в воде варьировалось от 200 до 539 млн⁻¹. В заливе Гренфьорд продукты диссоциации угольной кислоты в виде гидрокарбонатов и карбонатов в среднем составляют 1533 мкмоль/дм³ и 106 мкмоль/дм³. В заливе Исфьорд средние значения составляют 1534 мкмоль/дм³ и 101 мкмоль/дм³. Поверхностный слой морской воды достаточно насыщен арагоном. Рассчитанные концентрации растворенного СО₂ варьируются от 11,5 мкмоль/дм³ до 36 мкмоль/дм³ [3]. В летний сезон 2023 г. не наблюдалось значительной разницы в распределении величин параметров карбонатной системы как в заливе Исфьорд, так и в заливе Гренфьорд, а полученные данные в целом имели сходимость с данными, полученными в летне-осенний сезон 2022 г. Предварительно можно заключить, что морская система заливов Исфьорд и Грэнфьорд характеризовалась достаточной буферной емкостью в отношении закисления океана, определяемой по фактору Ревеля [4], который в исследуемых заливах составлял 12, что укладывается в диапазон 8-20 принятых нормальных значений для морской воды.

Работы выполнены в рамках Соглашения № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 года в ходе реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ". Коллектив авторов благодарит сотрудников Российской арктической экспедицией на архипелаге Шпицберген (РАЭ-Ш) за экспедиционно-логистическую поддержку.

Список литературы

- 1) Блошкина Е.В., Фильчук К.В. Современное состояние вод фьордов Западного Шпицбергена. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. № 64(2). С.125–140
- 2) Robbins L.L., Hansen M.E., Kleypas J.A. and Meylan S.C. CO₂calc—A user-friendly seawater carbon calculator for Windows, Mac OS X, and iOS (iPhone) // U.S. Geological Survey OpenFile Report 2010-1280. 2010. P. 17.
- 3) Alekseeva N.K., Nikulina A.L., Ryzhov I.V., Novikhin A.E., Kornilova R.V., Smirnov N.A. and Fedorova A.A.. Marine Carbonate System Parameters of the West Spitsbergen Fjords in Late Summer 2022. // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Conference Proceedings Springer Nature. Complex Investigation of the World Ocean (CIWO-2023). 2023. P. 233-239.
- 4) Egleston E. S., Sabine C. L., Morel F. M. M. Revelle revisited: Buffer factors that quantify the response of ocean chemistry to changes in DIC and alkalinity //Global Biogeochem. Cycles V24 (1). 2010.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ИНДИЙСКОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА В ЛЕТНИЙ И ОСЕННИЙ СЕЗОН 2021-2022 ГГ.

Анисимова Е.В.^{1,2}, Духова Л.А.², Лавинен Н.А.¹, Тарасенко А.Д.¹,

¹Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

²Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

Ключевые слова: Южный океан, индоокеанский сектор, водные массы, поверхностные воды гидрохимическая структура

Южный океан представляет собой обширную область Мирового океана с самостоятельной системой циркуляции вод, характерной структурой водных масс и фронтальных зон. Здесь формируется Антарктическая донная водная масса (АДВ), участвующая в вентилиации глубинных слоёв Мирового океана, здесь же расположены высокопродуктивные районы, потенциально интересные для промысла криля [1,2]. Исследование этих вопросов требует регулярных натурных наблюдений.

В данной работе представлены результаты океанологических исследований в Индийском секторе Южного океана в составе 67-Российской антарктической экспедиции (РАЭ) с декабря 2021 г. по май 2022 г. на борту НЭС «Академик Фёдоров». По ходу судна от порта Кейптаун до станции Прогресс (7-16 декабря 2021 г.) и от станции Новолазаревская до порта Кейптауна (9-14 мая 2022 г.) для определения концентрации растворённого кремния и фосфора каждый час проводился отбор поверхностных проб воды объёмом 0,5 литра; температура воды фиксировалась по данным судовых датчиков. С 4 по 11 февраля было выполнено два океанологических разреза, расположенных на шельфе и в глубоководной части морей Дейвиса и Моусона. Исследования на станциях включали в себя вертикальное гидрологическое зондирование с помощью CTD SBE19+, химический анализ проб воды (определение концентрации растворённого кислорода, кремния и фосфора) на стандартных горизонтах. Все гидрохимические анализы проб воды проводились в судовой лаборатории согласно методике [3].

Гидрохимический анализ поверхностных проб воды в совокупности с показаниями температуры позволил с большой точностью определить границы наиболее продуктивных фронтальных зон [4]. В летний период с 7 по 16 декабря 2021 года резкие градиенты концентраций фосфатов в поверхностных пробах были показательны для Субтропического (от 0,79 до 1,01 μM) и Субантарктического (от 1,38 до 1,60 μM) фронтов на 44⁰ ю.ш., 46⁰ ю.ш. соответственно. Южный Полярный фронт (ЮПФ) определялся по первому пику возрастающих концентраций кремния от 11 до 21 μM в районе 48⁰ ю.ш. Следующий градиент увеличения концентраций кремния на 50⁰ ю.ш. от 28,3 до 42,4 μM , и продолжающимся ростом концентрации кремния с продвижением на юг, связан с более активным влиянием высокоширотных вод (ВВ) и Антарктического циркумполярного течения. Высокоширотные воды с температурой ниже 0⁰С и концентрацией кремния до 63,4 μM были зафиксированы южнее 53⁰ ю.ш.

В осенний период исследований поверхностных вод по ходу судна (с 9 по 14 мая) фронты с градиентами тех же порядков располагались южнее, а для определения границ дополнительно использовались значения Si/P [5]. Воды Южной полярной фронтальной зоны, расположенной между САФ и ЮПФ, можно ограничить по значению Si/P от 2,7 до 6,8 с 46⁰ ю.ш. до 50,7⁰ ю.ш. Влияние вод АЦТ зафиксировано по резкому росту концентраций растворённого кремния с 28,3 до 42,4 μM на 53,2⁰ ю.ш. При этом ВВ располагались южнее 60⁰ ю.ш. и были определены по отрицательным значениям температуры.

На шельфе в Индийском секторе Южного океана в летний период могут создаваться особые условия гидрологического режима, способствующие формированию АДВ, которая играет важнейшую роль в вентилиации глубинных слоёв в Мировом океане. Важно отметить, что по полученным

данным в районе исследований в 2021-2022 гг. ожидаемое формирование АДВ зафиксировано не было. В период исследований наблюдалась классическая картина распределения водных масс на антарктическом шельфе.

Тёплая циркумполярная глубинная вода (ЦГВ), поступающая с севера, проникала до бровки шельфа в море Дейвиса. Ее максимальная температура в ядре достигала 1°C , солёность - до 34,71 psu, а повышенная концентрация растворённого кремния - около $110\ \mu\text{M}$ на горизонте 500-600 м. Однако глубинные максимумы биогенных веществ и температуры ЦГВ в море Моусона, зафиксированные на горизонте 500 м, достигали уже 64° ю.ш. Воды ЦГВ как правило мало насыщены кислородом, и в районе исследований его процент насыщения составил 61-70 %. На вертикальных разрезах также чётко прослеживается наличие переохлаждённых вод шельфового ледника с температурой -2°C на шельфе моря Моусона и $-1,9^{\circ}\text{C}$ в море Дейвиса. Модифицированные воды ЦГВ (МЦГВ) располагались на горизонтах от 50 до 200-250 м. Концентрация растворённого кремния в МЦГВ изменялась от 70 до $50\ \mu\text{M}$, а насыщение кислорода составляло 80-90 %.

В верхнем горизонте (0-50 м) на обоих разрезах наблюдались прогретые распреснённые воды с температурой до 0°C . На шельфе в море Моусона в прибрежной части меридионального разреза поверхностный слой был насыщен кислородом ($>110\%$), а концентрации биогенных веществ были относительно малы, что может свидетельствовать о недавней вспышке цветения фитопланктона. В море Дейвиса разрез на шельфе проходил по 66° ю.ш., где в поверхностном слое также отмечены вероятные очаги цветения фитопланктона, но только в восточной части разреза: там насыщение кислородом составило 100 %, температура воды поднималась до $-0,8^{\circ}\text{C}$, а концентрации биогенных веществ также были минимальны.

Работа выполнена в рамках 67-й РАЭ Арктического и Антарктического научно-исследовательского института.

Список литературы

- 1) Масленников В.В. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: ВНИРО, 2003. 295 с.
- 2) Orsi A.H., Whitworth Th. III, Nowlin W. D. Jr. On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res. V. 42. № 5. 1995. P. 641–673.
- 3) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.
- 4) Артамонова К.В., Гангнус И.А., Духова Л.А., Масленников В.В., Лавинен Н.А. Пространственная гидрохимическая структура поверхностного слоя атлантического и индоокеанского секторов Южного океана // Проблемы Арктики и Антарктики. Т. 67. № 4. 2021. С. 328–347.
- 5) Аржанова Н.В., Михайловский Ю.А. Гидрохимические условия в районах промысловых скоплений криля в южной части моря Скоша и в тихоокеанском секторе Антарктики // Труды ВНИРО. Биологические ресурсы антарктического криля. 1980. С.73 – 79.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ВЗВЕШЕННОГО ВЕЩЕСТВА И ГРАНИЦЫ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ УСЛОВИЙ В ГДАНЬСКОЙ ВПАДИНЕ В 2022 - 2023 ГГ.

Балашова К.А.¹, Ефимова К.А.^{1,2}, Бубнова Е.С.^{1,2}

¹ Балтийский Федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: взвешенное вещество, растворенный кислород, Балтийское море, Гданьская впадина.

Балтийское море характеризуется особым гидрохимическим режимом, который определяют слабый водообмен с Северным морем, значительная антропогенная нагрузка и малая глубина. В придонном слое Гданьской впадины формируется гипоксия, сезонно сменяемая аноксией и восстановительными условиями [1]. Под влиянием сезонных изменений окислительно-восстановительных условий в этом районе формируются придонные и промежуточные нефелоидные слои (НС). Эти НС изменяют локальные условия седиментации и транспорта взвешенного вещества.

Исследование было проведено в российском секторе в юго-восточной части Балтийского моря. В качестве опорного был использован многолетний гидрофизический разрез, который располагается вдоль границы с польской исключительной экономической зоной (ИЭЗ). Концентрация взвешенного вещества определялась методом вакуумной фильтрации с использованием GF/f (0,6–0,8 мкм) и ядерных (0,45 мкм) фильтров. Содержание растворенного кислорода определялось методом Винклера [2]. В основу исследования легли экспедиционные натурные данные за четыре сезона, полученные в период с декабря 2022 года по ноябрь 2023 года (91 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», 55 рейс ПС «Академик Сергей Вавилов», 53 и 54 рейсы НИС «Академик Борис Петров»). Всего было получено 343 пробы растворенного кислорода и 292 пробы взвешенного вещества.

В декабре 2022 года (АМК91) минимальная зафиксированная концентрация кислорода составила 0,07 мл/л на глубине 92 м, максимальная — 8,37 мл/л на глубине 23 м. Вода с концентрацией кислорода менее 2 мл/л преимущественно располагалась ниже 73 м. В придонном слое сложились аноксидные условия, было зафиксировано наличие сероводорода (до 1,34 мг/л, 88 м), замедляющего разложение оседающего органического вещества. Концентрация взвешенного вещества находилась в диапазоне от 0,08 мг/л (0 м) до 2,54 мг/л (78 м). Средняя концентрация взвешенного вещества для придонного слоя (80–105 м) составила 0,63 мг/л, максимальное значение — 2,54 мг/л (78 м).

В апреле 2023 года (АСВ55) максимальное содержание кислорода составило 10,6 мл/л в поверхностном слое, минимальное — 0,02 мл/л (90 м), зафиксировано присутствие сероводорода (до 1,16 мг/л, 90 м, при общей глубине моря 103 м). Средняя концентрация взвеси в исследуемом районе весной была выше, чем во время зимней съемки — 0,60 мг/л по сравнению с 0,36 мг/л в декабре. В это время происходит увеличение биомассы и первичной продукции, возрастает количество органического вещества и, как следствие, взвеси биогенного происхождения. Вертикальное распределение взвеси отличается от зимнего периода, максимальные значения характерны для подповерхностного слоя (0–15 м), абсолютный максимум — 1,67 мг/л (15 м), минимум на придонном слое (60–106 м), абсолютный минимум — 0,05 мг/л (60 м).

В мае 2023 года (АБП53) концентрации кислорода ниже 2 мл/л отмечались глубже 83 м. Минимальная концентрация кислорода в этот сезон — 0,02 мл/л (96 м). Также, максимум кислорода был ниже, чем весной и составил 9,34 мл/л (0 м). В придонном слое условия практически бескислородные. Диапазон концентрации взвешенного вещества шире: от 0,18 мг/л (50 м) до 4,1 (0 м). Основная масса взвеси образуется в этот период в поверхностном и подповерхностном слое.

В ноябре 2023 года (АБП54) концентрации кислорода ниже 2 мл/л отмечались глубже 60 м. Минимальное содержание кислорода составило 0,05 мл/м (92 м), максимальное — 7,56 мл/л (0 м). В придонном слое наблюдается присутствие сероводорода (до 1,36 мг/л, 85 м). Характер вертикального распределения концентраций взвеси аналогичен таковому в летний период, но без высоких значений в поверхностном слое. Это объясняется снижением количества диатомовых водорослей и динофлагеллят, также снижается активность протекания биохимических процессов на данном горизонте в осенний сезон.

Сезонный ход растворенного кислорода и наличие промежуточных пиков растворенного сероводорода указывает на влияние промежуточных бароклинических затоков вод из западных бассейнов Балтийского моря. При наличии промежуточных пиков сероводорода могут образовываться промежуточные пики концентрации взвеси. Гипоксические условия в придонном слое приводят к образованию слоя сероводородного заражения и слоя сосуществования кислорода и сероводорода. Наличие границы перехода от окислительных условий к восстановительным в придонном слое приводит к повышению концентрации взвешенного вещества. В весеннее и летнее время увеличивается концентрация взвешенного вещества ввиду роста органического вещества в поверхностном слое, что влечет и рост концентрации взвеси в слое придонном. Пиковые значения кислорода характерны для весеннего периода, когда вода еще не прогрета, однако фотосинтетическая активность холодноводного фитопланктона уже началась (апрельский максимум диатомовых и динофлагеллят [3]).

Данные по концентрации и распределению растворенного кислорода получены в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0025, данные концентрации взвешенного вещества в рамках грантового проекта РНФ № 22-77-00069.

Список литературы

- 1) Krapf K., Naumann M., Dutheil C., Meier H. Investigating Hypoxic and Euxinic Area Changes Based on Various Datasets From the Baltic Sea// *Front. Mar. Sci.* 2022. Vol. 9:823476. doi: 10.3389/fmars.2022.823476
- 2) Бордовский О. К., Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана// М.: ИО РАН. – 1992.
- 3) Wasmund N., Nausch G., Feistel R. Silicate consumption: an indicator for long-term trends in spring diatom development in the Baltic Sea// *Journal of Plankton Research.* 2013. V. 35(2). P. 393–406, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbs10>

ВЛИЯНИЕ ОБСКО-ЕНИСЕЙСКОГО СТОКА НА ГИДРОХИМИЧЕСКУЮ СТРУКТУРУ ЗАЛИВА БЛАГОПОЛУЧИЯ (НОВАЯ ЗЕМЛЯ) В 2022 И 2023 Г.

Борисенко Г.В., Полухин А.А., Щука А.С., Колтовская Е.В.

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Океанологии им. П.П. Ширшова
Российской Академии Наук*

Ключевые слова: Карское море, гидрохимия, речной сток, Новая Земля, Арктика, заливы Новой Земли, залив Благополучия

Арктика является одним из наиболее уязвимых регионов к последствиям изменения климата. За последнее столетие температура в регионе повысилась на 2–3 °С, что в два раза превышает среднемировой показатель [1]. В течение последних 16 лет Институт океанологии РАН посредством проводимых экспедиций исследует Арктику. Результаты экспедиций по проекту "Экосистемы Российской Арктики" дали представление о современных особенностях структуры и функционирования экосистемы Карского моря, количественно характеризуют ее важнейшие абиотические и биотические компоненты. Карское море принимает сток крупнейших рек Сибири – Оби и Енисей, который в сумме достигает 1300 км³ [1]. Наблюдаются 3 основных типа распространения речных вод в акватории Карского моря: «западный», «центральный», «восточный», соответственно линза опресненных вод перемещается на запад, на север, или на восток [2]. При западном типе распространения, который характерен для теплого времени года, опресненные поверхностные воды достигают восточного берега Новой Земли и заливов Новой Земли [2, 3].

В 2022 и в 2023 году в рамках экосистемных исследований Арктики по проекту "Экосистемы Российской Арктики" были проведены комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Карского моря и акватории з. Благополучия (о. Северный, Новая Земля). Залив Благополучия – фьордообразный залив протяженностью ≈11 км. В самой северной части залива расположена мелководная (30 м) бухта Укромная. Залив обладает собственным пресноводным стоком, поскольку в него разгружается большое количество мелких ручьев [4, 5].

Материалами текущей работы служили гидрохимические и гидрофизические данные по 20 комплексным станциям в акватории з. Благополучия (2022 г. и 2023 г.). Целью работы являлось выявление влияния речного стока на акваторию з. Благополучия.

Измерение температуры и солености производилось путем зондирования с помощью океанологического зонда SBE 911 Plus. Пробы воды отбирались пластиковым батометром на станциях, в специально подготовленные стеклянные и пластиковые бутылки с завинчивающимися пробками в соответствии с ГОСТ Р 51592-2000, ГОСТ 17.1.5.04-81 и методиками, используемыми для анализа. Анализируемые параметры: концентрация кислорода, насыщение кислорода, концентрации биогенных элементов, параметры карбонатной системы. Методы анализа гидрохимических параметров описаны в [6]. В ходе работы рассчитывался параметр удельной щелочности, представляющий собой соотношение щелочности и солености. Использовались спутниковые снимки, отражающие концентрации хлорофилла А в акватории Карского моря [<https://optics.ocean.ru/>].

В 2022 и 2023 годах в акватории з. Благополучия было обнаружено опреснение, вызванное влиянием Обско-Енисейского стока. По гидрофизическим и гидрохимическим данным выявлено, что в з. Благополучия в 2022 и 2023 г. наблюдается двухслойная структура: водная толща залива в 2022 и 2023 г. подразделяется на верхний слой (толщиной 40 м.) в значительной степени опресненный (26 епс), имеющий концентрации нитратного азота 0 μМ, растворенного кремния 16 μМ, и нижний слой вод, имеющий типичные для вод Карского моря свойства. В верхней 40 м. толще величина параметра удельной щелочности составляла более 70. Согласно карте из Атласа оптических характеристик [<https://optics.ocean.ru/>] можно выявить адвекцию вод Обско-Енисейского происхождения во все изучаемые заливы в 2022 г., в 2023 г. тип распространения Обско-Енисейских

вод был центральным и не доходил до заливов. Таким образом, в пользу утверждения, о том что, опреснение и гидрохимические характеристики находятся под влиянием материкового стока говорит несколько фактов: во-первых, наблюдаемый с помощью спутника MODIS-AQUA плюм в 2022 году и его адвекция в заливы Новой Земли, во-вторых толщина распресненного слоя составляла 40 м. Из литературных данных известно, что реки впадающие непосредственно в з. Благополучия (Укромная и Базовая) имеют локальное влияние и не способны образовать в акватории залива такого распреснения [5].

Финансирование. Грант РНФ 24-27-00079 "Влияние ледникового стока на гидрохимическую структуру и первичную продуктивность заливов Новой Земли (Карский берег)"

Список литературы

- 1) Aagaard K., Carmack E. C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation //Journal of Geophysical Research: Oceans. – 1989. – Т. 94. – №. C10. – С. 14485-14498.
- 2) Зацепин А. Г., Завьялов, П. О., Кременецкий, В. В., Поярков, С. Г., Соловьев, Д. М. Поверхностный опресненный слой в Карском море //Океанология. – 2010. – Т. 50. – №. 5. – С. 698-708.
- 3) Гольдин Ю. А., Глуховец Д. И., Шатравин А. В. Пространственное распределение характеристик флуоресценции морской воды в Карском море по данным исследований 2013, 2014 гг. //Современные проблемы оптики естественных вод. – 2015. – Т. 8. – С. 17-21.
- 4) Удалов А. А., Веденин А. А., Симаков М. И. Донная фауна залива Благополучия (Новая Земля, Карское море) //Океанология. – 2016. – Т. 56. – №. 5. – С. 720-730.
- 5) Borisenko G. V., Polukhin A. A., Flint M. V. Dissolved silicon and nitrogen in glacial rivers and water of Blago bay (Russian Arctic, Novaya Zemlya): origin, variability and spreading //Проблемы Арктики и Антарктики. – 2023. – Т. 69. – №. 3. – С. 356-373.
- 6) Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Иваненков В.Н. М.: Институт океанологии РАН, 1992. 200 с

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ВОД НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «ГЕЛЕНДЖИК» В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Барварова А.О.¹, Полухин А.А.², Бердникова Е.К.¹, Мухаметов С.С.¹, Борисенко Г.В.²,
Пронина Ю.О.², Ребецкая Е.А.², Бородулина П.А.²

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии им. Ширшова РАН (ИОРАН), г. Москва

Ключевые слова: Химия океана, гидрохимия, карбонатная система, карбонатовый полигон.

Карбонатная система природных вод является важнейшим механизмом, играющим ключевую роль в регулировании величины рН и влияющим на многие физико-химические процессы в морской воде, в том числе на поток углекислого газа в системе океан-атмосфера. При этом воды Мирового океана могут, в зависимости от условий окружающей среды, как поглощать CO_2 , так и выступать его источником [1]. Изучение потоков углекислого газа, в свою очередь, является особенно актуальным в связи с высоким поступлением CO_2 в атмосферу в результате антропогенной деятельности. Этот процесс приводит к существенным изменениям в окружающей среде, в том числе к усилению парникового эффекта. Некоторые ученые также отмечают, что повышение концентрации CO_2 в атмосфере ведет к смещению карбонатного равновесия и, как следствие, к изменению величины рН в водах Мирового океана [2].

С целью исследования и мониторинга потоков CO_2 и других парниковых газов, а также оценки потенциала их поглощения на территории Российской Федерации была развернута сеть карбонатовых полигонов – участков земной поверхности с репрезентативными для данной территории природными условиями [3]. Одним из таких карбонатовых полигонов работает на базе Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН в морской прибрежной зоне города Геленджик. Акватория полигона включает в себя Голубую бухту, а также прилегающую прибрежную зону.

В рамках летней учебной океанологической практики, проходившей с 1 июня по 16 июля 2023 года в городе Геленджик на базе Южного отделения Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН были изучены параметры карбонатной системы вод Голубой бухты и прилегающей акватории, входящих в состав карбонатового полигона «Геленджик».

15 июня 2023 года на 8 станциях были отобраны поверхностные и придонные пробы для определения рН, общей щелочности, содержания кислорода и биогенных элементов. Одновременно с отбором проб проводилось измерение температуры, электропроводности, давления и других характеристик морской воды при помощи зонда YSI ProDSS (США) на соответствующих горизонтах. Показания электропроводности и давления были использованы для пересчета прибором в показания солености и глубины, соответственно. 20 июня 2023 года были проведены аналогичные измерения в приповерхностном слое воды и отобраны поверхностные пробы на тех же 8 станциях. Во всех поверхностных пробах измерялись рН и общая щелочность. Водородный показатель рН измерялся в лабораторных условиях кондуктометром-рН-метром Metrohm 913 (Швейцария) с учетом температурной поправки. Величина общей щелочности измерялась с использованием установки M2/5000 SI Analytics (Германия), по методике [4]. Эти характеристики, а также значения температуры, солености и давления на соответствующих горизонтах были использованы для расчета параметров карбонатной системы. Расчеты производились в программном обеспечении на основе макросов Excel CO2sys, предназначенном для вычисления параметров карбонатной системы [5].

Рассчитанная для съемки карбонатового полигона концентрация гидрокарбонат-ионов HCO_3^- 15 июня составляла от 2539,1 мкмоль/л до 2604,2 мкмоль/л, а 20 июня – от 2482,8 мкмоль/л до

2560,5 мкмоль/л. Концентрация карбонат-ионов 15 июня изменялась от 290,5 мкмоль/л до 311,2 мкмоль/л 15 июня и от 281,4 мкмоль/л до 290,0 мкмоль/л 20 июня. Таким образом, за 5 дней произошло уменьшение содержания CO_3^{2-} в исследуемой акватории. Концентрация HCO_3^- при этом также в среднем стала меньше. Рассчитанные концентрации растворенного углекислого газа были наименьшими по сравнению с концентрациями других компонентов карбонатной системы. Так, 15 июня содержание CO_2 в морской воде составляло от 13,0 мкмоль/кг до 14,0 мкмоль/кг. 20 июня содержание CO_2 в морской воде составило от 13,6 мкмоль/кг до 14,1 мкмоль/кг.

Измерения и расчеты, проведенные в рамках данной работы, позволили выявить некоторые закономерности пространственно-временной изменчивости состояния карбонатной системы и ее отдельных компонентов в водах Голубой бухты и прилегающей акватории в исследуемый период. Рост потоков углекислого газа с 15 по 20 июня привел к изменению концентраций компонентов карбонатной системы и смещению карбонатного равновесия. При снижении содержания гидрокарбонат-ионов и карбонат-ионов для большинства проб в целом выросло содержание растворенного в воде углекислого газа.

Изменения концентраций и соотношений растворенного углекислого газа, гидрокарбонат-ионов и карбонат-ионов в поверхностном слое воды соответствовали изменениям метеорологических условий и гидрофизических характеристик водной среды.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОРАН FMWE-2023-0001 «Исследование потоков климатически активных газов на карбоновом полигоне в Краснодарском крае».

Список литературы

- 1) Алекин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 334 с.
- 2) Borges A.V. Present day carbon dioxide fluxes in the coastal ocean and possible feedbacks under global change. *Oceans and the atmospheric carbon content*, 2011. P. 47–77.
- 3) <https://carbon-polygons.ru/>
- 4) Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. О.К. Бордовский, В.Н. Иваненков. – М.: АН СССР. Ин-т Океанологии, 1992. 200 с.
- 5) Pierrot D.E., Wallace D.W.R., Lewis E. MS Excel program developed for CO_2 system calculations. Carbon dioxide information analysis center, 2011. Doi: 10.3334/CDIAC/otg.CO2SYS_XLS_CDIAC105a.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА И ФЕОДОСИЙСКОГО ЗАЛИВА

Гурова Ю.С., Гуров К.И., Орехова Н.А.

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: донные отложения, поровые воды, кислород, органический углерод, полярография, Черное море

Донные отложения являются квазистационарной многокомпонентной системой и могут влиять на океанологические характеристики придонного слоя вод за счет формирования потоков веществ на их границе [1]. Именно с донными отложениями в первую очередь связывают конечный этап трансформации, миграции и накопления различных веществ. Неотъемлемой частью донных отложений является их жидкая фаза – поровые воды. Комплексное исследование донных отложений позволяет изучить биогеохимические процессы, определяющие окислительно-восстановительные и кислотно-основные свойства отложений, а также оценить состояние морской экосистемы в целом и описать механизм ее возможного изменения.

Район Южного берега Крыма (ЮБК) включает участок от м. Айя до Феодосийского залива. Вдоль его побережья сосредоточено большое количество объектов рекреационной инфраструктуры – санаторно-курортных и оздоровительных, также его берега характеризуются высокой плотностью застройки. По интенсивности антропогенной нагрузки в наибольшей степени выделяется Феодосийский залив, где основными факторами, определяющими состояние экосистемы, является деятельность предприятий морехозяйственного комплекса и сброс ливневых и сточных вод [2]. Стоит отметить, что данные о пространственном распределении фракций донных отложений и содержания в них органического углерода ($C_{\text{орг}}$) для района ЮБК представлены фрагментарно, в связи с чем их исследование является актуальным. Также актуальность работы обусловлена недостатком современных данных о химическом составе поровых вод донных отложений (содержании растворенных O_2 , $Mn(II)$, $Fe(II, III)$, FeS , H_2S)

Целью работы являлось рассмотрение особенностей гидролого-гидрохимических параметров в придонном слое вод, а также вертикального распределения геохимических характеристик отложений и химического профиля поровых вод Южного берега Крыма и Феодосийского залива.

Натурные данные были получены в ходе рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ ИнБЮМ). Всего было отобрано 38 кернов и 85 проб поверхностного слоя донных отложений. Пробы верхнего слоя (0–5 см) отложений отбирались с помощью дночерпателя Петерсона, а керны – с использованием ручного пробоотборника в виде акриловой грунтовой трубки (диаметр 60 мм) с вакуумным гидрозатвором. Для получения химического профиля поровых вод с высоким вертикальным разрешением использовался полярографический метод анализа со стеклянным $Au-Hg$ микроэлектродом [3]. Гранулометрический состав донных отложений определяли комбинированным методом декантации и рассеивания. Содержание $C_{\text{орг}}$ определяли на экспресс-анализаторе – АН7529.

Гранулометрический состав донных отложений ЮБК разнообразен. В районе бухты Ласпи в поверхностном (0–5 см) слое преобладал илистый материал (94%), гравийная фракция представлена слабо (до 2%), содержание песчаного материала составило около 1%. К юго-востоку от г. Севастополь размерный состав отложений становился крупнее. Содержание гравийной фракции на расположенных вблизи берега станциях в Лименском заливе достигало 23%, а илистого материала – 72%. Содержание $C_{\text{орг}}$ в поверхностном слое отложений на этом участке не превышало 2,7% сух. масс В северо-восточном направлении от г. Ялты до г. Судак донные отложения были представлены преимущественно илистым материалом (72–95%), с увеличением доли пелитовой фракции от 55% до 89%. Содержание $C_{\text{орг}}$ на этом участке в среднем составило 1,5% сух. масс.

Для Феодосийского залива отмечена максимальная доля илистого материала, содержание которого убывало от центральной части акватории (97%) к мористой (79%). Содержание гравийной фракции в акватории было минимально (1–2%) и незначительно увеличивалось до 8% в мористой части за счет увеличения доли ракушечного детрита. В среднем содержание $C_{орг}$ в центральной части залива составило 1% сух. масс., а в мористой – 1,4% сух. масс. Таким образом, содержание $C_{орг}$ в донных отложениях Феодосийского залива в среднем ниже в сравнении с мелководными станциями в районе ЮБК и указывают на то, что мелкозернистый илистый материал поступает в акваторию залива в первую очередь с терригенными источниками и продуктами абразии берегов, а не в результате биогенного осаждения.

Несмотря на насыщение придонных вод кислородом (84% нас.) в районе бухты Ласпи преобладание в отложениях мелкозернистой фракции привело к тому, что, на поверхности отложений кислород отсутствовал. Высокая динамика вод на приглубых участках ЮБК от г. Ялта до г. Судак способствовала насыщению придонных вод кислородом (до 105% нас.). На большинстве станций кислород проникал в отложения до 20 мм. Исключение составила станция в районе с. Рыбачье, где сероводород присутствовал уже на поверхности отложений, что указывает на развитие анаэробных условий. Это, вероятно, объясняется увеличением доли мелкозернистого пелитового материала (до 80%) и содержанием в отложениях $C_{орг} > 2\%$ сух. масс. Кроме того, особенности очертания береговой линии на этом участке приводят к уменьшению скоростей придонных течений и, как следствие, ослаблению вентиляции придонного слоя вод.

В поверхностном слое отложений Феодосийского залива кислород отсутствовал, несмотря на насыщенность придонного слоя вод кислородом (до 110% нас.) и меньшем содержании $C_{орг}$, чем на других участках ЮБК. Также показано, что в Феодосийском заливе по мере удаления станций от берега отмечается значительное снижение концентрации сероводорода в кернах донных отложений, что объясняется в первую очередь сокращением доли илистой фракции до 80%.

Установлено, что основными компонентами поровых вод ЮБК являлись кислород (в верхнем слое донных отложений) и восстановленные формы железа и серы (в более глубоких слоях). Активная динамика вод обеспечивала насыщение кислородом водной толщи и верхнего слоя отложений и способствовала формированию аэробных условий, за исключением некоторых мест со значительной антропогенной нагрузкой. Установлено, что высокие концентрации сероводорода в поровых водах отмеченные для Феодосийского залива (270 мкМ) определялись преобладанием мелкодисперсной фракции (до 97 %).

Работа выполнена в рамках тем государственного задания FNNN-2024-0001 «Океанологические процессы» и FNNN-2022-0002 «Карбоновый полигон».

Список литературы

- 1) Вершинин, А.В. Химический анализ на границе вода-дно в океанах и морях / А.В. Вершинин, А.Г. Розанов. М.: ГЕОС, 2002. 164 с.
- 2) Gurova, Y.S. Characteristics of Bottom Sediments in the Coastal Areas of the Crimean Peninsula / Y.S. Gurova, K.I. Gurov, N.A. Orekhova // Land. 2022. 11. P. 1884.
- 3) Орехова Н.А., Коновалов Кислород и сульфиды в донных отложениях прибрежных районов Севастопольского региона Крыма // Океанология. 2018. Т. 58. № 5. С. 739–750.

ПРОДУКЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ МОРЕЙ СИБИРСКОГО ШЕЛЬФА ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2018-2021 ГГ.

Еремейко Т.Н.

Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: первичная продукция, биогенные элементы, хлорофилл-А, межгодовая изменчивость, Баренцево море, Карское море, море Лаптевых

Первичная продукция служит основой для оценки количества органического вещества, нисходящего из верхних слоев океана и захороняющегося на дне, а также обмена углекислого газа в системе «океан–атмосфера». Многолетние изменения годовых значений первичной продукции являются одним из индикаторов изменчивости климата на планете. Их изучение особенно актуально в свете быстрого потепления Северного Ледовитого океана в последние десятилетия, связанного с повышением температуры воды, что приводит к сокращению площади и толщины ледяного покрова, из-за минимальной площади которого за последние 14 лет чистая первичная продукция (ЧПП) увеличилась как минимум на 30% [1].

В рамках данного исследования был произведен анализ межгодовой изменчивости ЧПП в фотическом слое на основе данных, полученных в ходе экспедиционных работ Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) в августе–сентябре 2018–2021 гг. в акватории трёх шельфовых морей — Баренцева, Карского и моря Лаптевых. Расчёты ЧПП производились двумя методами: расчёт первичной продукции по биогенным элементам (формула 1), основанном на уменьшении содержания питательных веществ, потребляемых фитопланктоном в процессе фотосинтеза в фотическом слое в период от начала вегетации до момента исследования [2].

$$\text{ЧПП} [\text{мгС}/\text{м}^2/\text{год}] = (\text{NO}_3 + \text{NO}_2) \times 30 \times 6.625 \times 12, (1)$$

где $(\text{NO}_3 + \text{NO}_2)$ — среднее значение суммы нитритов и нитратов, полученной в зимнем перемешанном слое, запасы биогенных элементов в котором отражают то, каким был весь фотический слой до начала вегетации, а к моменту измерений мы полагаем, что все запасы израсходованы; 30 — толщина зимнего перемешанного слоя, в метрах; 6.625 — азотный коэффициент, полученный из соотношения Редфилда 106C:16N:1P, так как именно азот считается лимитирующим элементом для роста и развития первичных продуцентов в арктических морях; 12 — атомная масса углерода.

А также применялся метод расчёта первичной продукции по ассимиляционному числу хлорофилла-А (формулы 2–4). Прямое определение первичной продукции обычно проводится эпизодически, в то время как распределение хлорофилла-А в водных объектах хорошо изучено. Между этими показателями существует количественная связь, которая выражается ассимиляционным числом (АЧ), — это отношение значения первичной продукции на единицу хлорофилла-А [2]. Для данного исследования применялось универсальное осреднённое АЧ, рассчитанное для всех экспедиций.

$$\text{ПП}_ч [\text{мгС}/\text{м}^2/\text{ч}] = \text{Х}_{\text{л}_а} \times \text{АЧ}, (2)$$

$$\text{ПП}_д [\text{мгС}/\text{м}^2/\text{день}] = \text{ПП}_ч \times 16 \times 18, (3)$$

$$\text{ПП}_г [\text{мгС}/\text{м}^2/\text{год}] = \text{ПП}_д \times 22, (4)$$

где $\text{Х}_{\text{л}_а}$ — подповерхностный максимум хлорофилла-А; 16 — число световых часов в день; 18 — глубина видимости диска Секки, в метрах; 22 — количество дней вегетационного периода на основе графика вегетационной активности в подповерхностном максимуме хлорофилла-А из [3].

Исходя из сравнительного анализа межгодовых изменений ЧПП, отмечается многолетний тренд на увеличение объёмов первичной продукции в морях сибирского шельфа. Так в наиболее репрезентативном регионе (северо-запад моря Лаптевых) ЧПП_{биогены} меняется с 2347,9 мгС/м²/год в

2018 году до 8604,4 мгС/м²/год в 2021 году (в 3,4 раза выше), а значения ЧПП_{хл-а} возрастают от 1374 мгС/м²/год до 3633 мгС/м²/год.

На основе полученных результатов ЧПП была проведена оценка потенциальной биологической продуктивности в ТгС/год по семи регионам исследуемых морей. Регионы были выделены на основе вертикальной стратификации водных масс в Северном Ледовитом океане [4]. Для оценки использовалась простая формула (5), которая заключается в умножении средних значений годовой ЧПП на квадратный метр для каждого региона на площадь региона.

Региональная потенциальная биологическая продуктивность = $NPP \times S / 10^{15}$ (5)

Таким образом наиболее продуктивными регионами были выявлены районы речного стока Карского моря и моря Лаптевых, где значения могут достигать до 2 ТгС/год, а также северные районы этих морей, где продуктивность может достигать 2,95 ТгС/год. Следует отметить, что продукционный потенциал увеличивается в западном направлении. Так продуктивность Карского моря заметно выше, чем в море Лаптевых, из-за большей подверженности атлантификации и влиянию баренцевоморских вод. Наименее продуктивными являются регионы, которые недостаточно подвержены влиянию затоковых вод или же их вегетационный период окончился раньше периода исследований.

Вместе с тем наблюдается продолжающаяся атлантификация морей сибирского шельфа, что подтверждают исследования до 2018 года [5]. Так, например, продуктивность в районе материкового склона моря Лаптевых с годами возрастает от 0,47–0,81 ТгС/год до 1,25–2,95 ТгС/год.

Натурные данные были получены в ходе выполнения работ в рамках Соглашения № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 года в ходе реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ".

Список литературы

- 1) Arrigo, K. Continued increases in Arctic Ocean primary production / K. Arrigo, G. van Dijken // *Progress in Oceanography*. — 2015. — № 136. — p. 60–70.
- 2) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана / под общей редакцией В. В. Сапожникова — М.: Изд-во ВНИРО, 2003. — 202 с.
- 3) Sea-ice retreat controls timing of summer plankton blooms in the Eastern Arctic Ocean / M. Janout [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2016. — №43. — p. 12493–12501.
- 4) Никифоров, Е.Г., Шпайхер, А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 269 с.
- 5) Increasing nutrient fluxes and mixing regime changes in the eastern Arctic Ocean / K. Shulz [et al.] // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — №49. — e2021GL096152.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ГИПОКСИИ В АМУРСКОМ ЗАЛИВЕ (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

Зайцева П.Д.¹, Еремина Т.Р.¹, Курносова А.С.²

¹Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург

²Тихоокеанский филиал ФГБНУ "ВНИРО" ("ТИНРО"), г. Владивосток

Ключевые слова: гипоксия, эвтрофикация, биогенные вещества, растворённый кислород, химия, экология

Развитие хозяйственной деятельности на побережье и акватории Амурского залива (Японское море) в течение последних 20-30 лет привело к эвтрофикации залива, т.е. к перенасыщению вод биогенными элементами, в частности азотом и фосфором, которые могут вызвать рост водорослей и увеличить потребление кислорода в воде, что в свою очередь приводит к гипоксии природных вод [1].

К наиболее опасным последствиям гипоксии можно отнести такие причины как гибель водных организмов и уменьшение биоразнообразия водных экосистем, изменение химического состава воды, закисление природных вод.

Целью работы является проанализировать данные о межгодовой, а также сезонной изменчивости содержания растворённого кислорода в водах Амурского залива, установить возможные причины, приводящие к формированию и разрушению гипоксии.

Для проведения анализа изменений концентраций кислорода и биогенных веществ, а также определения периодов формирования и разрушения гипоксии, исходными данными послужили данные гидрохимических определений проб воды из Амурского залива за 2015-2022 гг. (кислород, фосфаты, минеральный азот, растворенный кислород, pH), а также данные профилей показателей, измеренных зондом ASTD-102 Rinko (TS, кислород, хлорофилл а, гидрохимические показатели добавлены на горизонтах отбора проб) в Амурском заливе за 2015-2020 гг.

Образование гипоксии обусловлено микробиологической деструкцией фитопланктона, что является результатом эвтрофикации [2]. Для определения его уровня использовался индекс трофности воды E-TRIX [3]. Он является функцией концентраций фосфора, минеральных форм азота, растворенного кислорода и хлорофилла «а» и определяется по формуле:

$$E-TRIX = (\lg[\text{Chl} \cdot D\%O \cdot N \cdot P] + 1,5)/1,2$$

где Chl – концентрация хлорофилла «а», мкг/л; D%O – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения, N – концентрация растворенных форм минерального азота, мкг/л, P – концентрация фосфора, мкг/л.

Исходя из следующей оценки состояния качества вод, где значение E-TRIX обозначает определённый уровень трофности: < 4 – низкий; 4 – 5 – средний; 5 – 6 – высокий; > 6 – очень высокий, можно сделать вывод, что во второй половине лета-начале осени эвтрофикация достигает максимальных значений, преимущественно в кустовой зоне, максимальные значения индекса E-TRIX были зафиксированы в сентябре 2016 – 8,86 и 9,17. Очень высокий уровень трофности наблюдался в прибрежной зоне. В этой области биогенные вещества могут поступать из рек, которые впадают в море, или со сточными водами, богатыми органическими веществами, которые поступают из прибрежных зон. Также, за счёт небольшой глубины, проникновение солнечного света до дна обеспечивает достаточное количество света для цветения фитопланктона во всей толще вод.

Наблюдалась следующая особенность в распределении кислорода в придонном слое в июле-сентябре – наличие гипоксии у дна в центральной части залива, где минимальные концентрации кислорода составили 1,69 мл/л в 2017 г.; 1,01 мл/л в 2018 г. и 1,17 мл/л в 2019 г. из этого следует вывод, что на данных точках, в придонном слое, происходит интенсивное потребление кислорода на окисление органического вещества.

Мониторинговые работы выполнены в рамках бюджетного финансирования Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» ("ТИНРО")

Список литературы

- 1) Тищенко, П.Я., Лобанов, В.Б., Звалинский, В.И. и др. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // Известия ТИНРО. 2011. Т. 165. С. 136-157.
- 2) Морозова О. Г. Факторы эвтрофикации экосистемы водоемов-охладителей и принципы оптимизации качества воды для технологических целей и аквакультуры: автореф. дисс. ... д-ра биолог. наук: 03.00.16 / О. Г. Морозова. - Красноярск, 2003. - 38 с. для технологических целей и аквакультуры. 11-14
- 3) Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G. et al. Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // Environmetrics. 1998. 9, Iss. 3. P. 329 – 357. doi:10.1002/(SICI)1099-095X(199805/06)9:33.0.CO;2-9]

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ВОД КАРСКОГО МОРЯ В ПЕРИОД ЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

Казакова У.А., Полухин А.А., Щука А.С.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: биогенные элементы, растворенный кислород, ледообразование, Карское море

Карское море – окраинное море Северного Ледовитого океана (СЛО), наиболее подвержено влиянию речного стока. На его долю приходится более половины стока всех рек российской Арктики [1]. Поступление речного стока, водообмен с Баренцевым морем и глубоководной частью СЛО, а также взаимодействие с атмосферой, циркуляция вод, ледовый режим и другие факторы определяют структуру вод Карского моря. Абиотические факторы среды, такие как распределение биогенных элементов, растворенного кислорода, являются важным компонентом функционирования морской экосистемы [2]. Воды, формирующиеся при таянии морского льда, наряду с речным стоком являются одним из источников формирования поверхностного опресненного слоя [3].

Конец летнего периода характеризуется увеличением толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и, соответственно, сглаживанием градиентов в распределении гидрохимических параметров между поверхностным и нижележащими слоями за счет конвективных процессов [4]. В зоне влияния речного стока прослеживалось увеличение толщины опресненного слоя, и наблюдался резкий градиент между ПОС и нижележащими слоями [5]. По величине первичной продукции воды Карского моря в конце летнего периода (октябрь) относятся к олиготрофному типу [6].

Основная цель работы – определение гидрохимических особенностей структуры вод при взаимодействии различных водных масс Карского моря в период ледообразования.

В основе работы лежат гидрохимические данные (содержание биогенных элементов, растворенного кислорода, параметры карбонатной системы), полученные в ходе экспедиций ИОРАН на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в конце летнего периода в 2021 и 2023 гг. (86 и 92 рейсы). Определение гидрохимических параметров проведено в соответствии со стандартными методиками.

Приведены результаты анализа пространственного распределения гидрохимических параметров в областях взаимодействия различных водных масс Карского моря: приустьевая область, Обская губа, желоб Святой Анны, Центральное Карское плато.

Конец летнего периода (октябрь) характеризуется снижением объема поступающего речного стока и, соответственно, изменением количества различных биогенных элементов аллохтонного происхождения в зоне влияния речного стока. Помимо этого, на концентрацию кислорода и содержание биогенных элементов оказывает влияние продукционно-деструкционные процессы.

Непосредственно у кромки формирующегося льда на Центральном Карском плато отмечалось повышенное содержание фосфатов ($0.3 \mu\text{M}$) и нитратов ($> 1 \mu\text{M}$) в поверхностном слое, что, скорее всего, связано с сезонными процессами: конвекцией и деструкцией органического вещества, о чем свидетельствуют положительные значения параметра Apparent Oxygen Utilization (AOU).

Сезонная изменчивость распределения гидрохимических параметров в толще вод наиболее интенсивно проявляется в поверхностном слое всех рассматриваемых районов и во всей толще в приустьевых областях рек. Значения гидрохимических параметров в придонных слоях и в глубоководных районах моря (желоб Святой Анны и желоб Воронина) в рассматриваемый период не сильно отличались от таковых в летний период. Это связано с преобладанием структурообразующих факторов, которые либо сглаживают градиенты гидрохимических параметров с течением времени либо не имеют выраженной сезонной изменчивости как, например, поступление речного стока.

В конце летнего периода при деструкции органического вещества наблюдаются концентрации биогенных элементов выше лимитирующего значения, что может быть показателем процесса рециклинга. Формирование такого запаса питательных веществ, предположительно, может быть причиной подледного цветения в ранне-весенний период при малом поступлении питательных веществ с речным стоком.

Полученные результаты являются важными для понимания сезонных различий гидрохимической структуры вод и особенностей функционирования морской экосистемы Карского моря в период формирования ледяного покрова.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2023-0002).

Список литературы

- 1) Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // Океанология. 2017. Т.57. №1 С.25-37.
- 2) Экологический Атлас. Карское море / В. О. Мокиевский, А. Б. Цетлин, Л. А. Сергиенко [и др.]; ООО «Арктический Научный Центр». – Москва: ООО «Арктический Научный Центр», 2016. – 272 с. – (Атласы морей Российской Арктики). – ISBN 978-5-9908796-0-7. – EDN ZUNIHV.
- 3) Kazakova U.A., Polukhin A.A., Shabanov P.A. Origin and evolution of the surface desalinated layer of the Kara Sea during the ice-free period // Journal of Marine Systems. 2024. Vol. 243. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2023.103950
- 4) Пивоваров С.В. Химическая океанография арктических морей России. – СПб, Гидрометеоздат, 2001. 88 с.
- 5) Osadchiev, A., Zabudkina, Z., Rogozhin, V., Frey, D., Gordey, A., Spivak, E., Salyuk, A., Semiletov, I. and Sedakov, R. Structure of the Ob-Yenisei plume in the Kara Sea shortly before autumn ice formation // Frontiers in Marine Science. 2023. 10:1129331. doi: 10.3389/fmars.2023.1129331
- 6) Демидов А.Б., Шеберстов С.В., Гагарин В.И., Хлебопашев П.В. Сезонная изменчивость первичной продукции фитопланктона Карского моря по спутниковым данным // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 103-117.

ГЕНЕРАЦИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ (МЕТАНА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА) ПРИ ОТТАИВАНИИ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Киль А.О.¹, Семенов П.Б.¹, Письменюк А.А.², Шатрова Е.В.^{1,3}, Малышев С.В.¹

¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, г. Москва, кафедра криолитологии и гляциологии

³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: подземные льды, метан, диоксид углерода, парниковые газы

Парниковые газы играют важную роль в климатической системе. Таяние вечной мерзлоты высвобождает реликтовый углерод в современный биогеохимический цикл, что приводит к увеличению эмиссии метана и углекислого газа в атмосферу [1,2]. Пробы подземных льдов, рассматриваемые в данной работе, отбирались из термоденудационных обнажений стационара «Васькины Дачи» на полуострове Ямал. Образцы подземных льдов представлены пластовыми льдами (ПЛ) и полигонально-жильными льдами (ПЖЛ). Данное исследование сфокусировано на определении количества и происхождении метана и диоксида углерода в подземных льдах.

Пробоподготовка и анализ молекулярного состава газов проводились в аналитическом центре ФГБУ «ВНИИОкеангеология» (АЦВ). Взвешенные фрагменты льда помещали в обжимной флакон, где газовый зазор заполняли чистым гелием, герметизировали резиновой пробкой и алюминиевым колпачком. Флаконы с оттаявшими образцами встряхивали при помощи орбитального шейкера в течение 3 часов. Затем отбирались пробы газа для анализа состава, дополнительно подготавливались пробы для отправки на анализ стабильных изотопов углерода и водорода в метане. Углеводородные газы состава C₁-C₅ (13 компонентов) определяли на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014 с пламенно-ионизационным детектором (ПИД) с неопределенностью ± 2,5%, CO₂ определяли на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014 с детектором по теплопроводности (ДТП) с неопределенностью ± 5%. Изотопные исследования углерода и водорода метана осуществлялись на изотопном масс-спектрометре Delta V Plus в аналитическом центре Казанского Федерального Университета (КФУ).

Концентрации метана в образцах с исследуемого района варьируют от 360 до 30720 ppm, а концентрации диоксида углерода - от 229 до 1489 ppm. Максимальные концентрации метана обнаружены в пластовых льдах, а минимальные в полигонально-жильных. Это связано с тем, что эпигенетическое промерзание, свойственное пластовым льдам, способствует захоронению в мерзлых толщах метана, генерируемого метаногенными археями в почвах гумидных обстановок [3]. Полученные изотопные сигнатуры δ¹³C CH₄ (PDB) варьируют от -70 до -79 ‰, а δD CH₄ (SMOW) от -335 до -380 ‰. Эти значения соответствуют диагностическим диапазонам микробного метаногенеза, представляющего собой комбинацию гидрогенотрофного и ацетокластического путей [4]. Значения δ¹³C диоксида углерода в среднем -19 ‰.

Учитывая опубликованные данные, можно заключить, что высвобождение «готового» / преформированного реликтового метана из подземных льдов, а также генерация CO₂ в результате аэробного дыхания и CH₄ в ходе анаэробного метаногенеза из органического вещества оттаивающих мерзлых пород являются процессами, обеспечивающими эмиссию ПГ в результате оттаивания вечной мерзлоты [1,3,4,5]. Пластовые льды имеют более высокий потенциал высвобождения ПГ в ходе оттаивания, чем полигонально-жильные льды из-за высокого содержания законсервированного CH₄.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ «Трансформация органического вещества и

генерация парниковых газов (диоксида углерода и метана) при оттаивании подземных льдов Российской Арктики в условиях лабораторного эксперимента» в 2023-24 гг." № 23-27-00123.

Список литературы

- 1) Semenov P. B. et al. Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission //Geosciences. – 2020. – V. 10. – №. 11. – P. 450.
- 2) Yokohata T. et al. Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model //Progress in Earth and Planetary Science. – 2020. – V. 7. – №. 1. – P. 1-14.
- 3) Streletskaya I. D. et al. Methane content in ground ice and sediments of the Kara Sea coast //Geosciences. – 2018. – V. 8. – №. 12. – P. 434.
- 4) Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // Chem. Geol. 1999. V. 161. P. 291–314.
- 5) Oblogov G. E. et al. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic //Geosciences. – 2020. – V. 10. – №. 10. – P. 412.

ИСТОЧНИКИ ОПРЕСНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД ЕВРАЗИЙСКОЙ ЧАСТИ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА ПО ИЗОТОПНЫМ (δD , $\delta^{18}O$) ДАННЫМ.

Коссова С.А., Дубинина Е.О., Чижова Ю.Н., Авдеенко А.С.

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

Ключевые слова: изотопы кислорода, изотопы водорода, Арктический шельф, опреснение поверхностных вод, континентальный сток, талый лед.

Отличительной особенностью Северного Ледовитого океана является его резко стратифицированная структура, с мощным промежуточным слоем соленых и теплых атлантических вод и тонким поверхностным опресненным слоем, формирование которого происходит за счет поступления континентального стока, взаимодействия с атмосферой и процессов, связанных с формированием льда [1, 2, 3]. Состав и структура опресненных вод на Арктическом шельфе являются неоднородными, и в связи с наблюдаемыми в последнее время климатическими изменениями, актуальной задачей является наблюдение за изменением пропорций морских, речных, талых и атмосферных вод, формирующих их. Изотопный состав кислорода и водорода – элементов, слагающих молекулу воды – является удобным и эффективным инструментом, который дает возможность не только установить природу пресного и морского компонента, но и оценивать их количественные соотношения [3].

Используя метод экстраполяции изотопных параметров на нулевую соленость, можно оценить изотопные характеристики глобального пресного компонента (ПК) для конкретного района. Так были получены оценки величин $\delta^{18}O$ усредненного глобального ПК для вод Северной Атлантики (-21‰ , [4]). На сегодняшний день практически все оценки получены на материале, отобранном ниже 60°с.ш. , в то время как в более высоких широтах линейная связь «изотопный состав-соленость» может быть искажена за счет модификации вод и таяния морского льда [3]. Это усложняет оценку усредненных параметров ПК в Арктическом океане, поскольку присутствие модифицированных вод приводит к заниженным, а присутствие талого морского или речного льда – к завышенным оценкам величин $\delta^{18}O$ и δD в пресном компоненте [5].

Идентификация изотопных параметров источников опреснения и механизмов, формирующих изотопные характеристики (δD , $\delta^{18}O$) поверхностных опресненных вод, циркулирующих в районе евразийского Арктического шельфа ($70\text{-}78^\circ\text{с.ш.}$) проведена на примере материалов 69 и 72 рейсов НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2017 и 2018 гг.). Для анализа были собраны образцы опресненных поверхностных морских вод вдоль двух разрезов, захвативших акватории Баренцева, Карского, Восточно-Сибирского морей, а также моря Лаптевых. Изотопный анализ кислорода выполнен методом CF-IRMS на масс-спектрометре DELTA V+. Изотопный анализ водорода выполнен методом DI IRMS на масс-спектрометре DELTAplus. Точность определяемых величин $\delta^{18}O$ и δD составила 0.05 и $\pm 0.3\text{‰}$ соответственно.

В результате получены уравнения связи величин $\delta^{18}O$ и δD с соленостью для высоких широт ($70\text{-}78^\circ\text{с.ш.}$), имеющие надежные статистические параметры и исключающие неопределенности, связанные с вкладом талого компонента. Уравнения описывают смешение с ПК, представленным двумя источниками – континентальным стоком и региональными атмосферными осадками. Для всех изученных районов полученные величины $\delta^{18}O$ ПК превышают значение, установленное для ПК поверхностных вод Северной Атлантики (-21‰), что указывает на отсутствие вклада изотопно-легкого стока с берегов Гренландии в поверхностные воды евразийского шельфа Арктики. Проведена оценка вклада атмосферных осадков в формирование ПК поверхностных вод, который оказался значительным – от 20 до 30-40 % в зависимости от географического положения и удаления от континента. Талый компонент в конце летнего сезона установлен только в водах Карского

моря, локализованных в районе Карских ворот и пролива Вилькицкого. Показано, что поверхностные воды Карского моря, содержащие талый компонент и воды, опресненные речным стоком, смешиваются при солености ≈ 27.5 е.п.с.

РНФ 23-17-00001

Список литературы

- 1) Alkire, M. B., Morison, J., Andersen, R. Variability in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2014. // *Journal of Geophysical Research*. – 2015. – V. 120. – P. 1573–1598.
- 2) Carmack, E. C., Yamamoto-Kawai, M., Haine, T. W. N., Bacon, S., Bluhm, B. A., Lique, C., Williams, W. J. Freshwater and its role in the Arctic marine system: Sources, disposition, storage, export, and physical and biogeochemical consequences in the Arctic and global oceans // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2015. – V. 121. – P. 675–717.
- 3) Ostlund H.G., Hut G. Arctic Ocean Water Mass Balance From Isotope Data // *Journal of Geophysical Research*. – 1984. – V. 89. – P. 6373-6381.
- 4) Craig H., Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere. *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*, Spoleto, Italy (Ed. Tongiogi E.V., Lishi E. F., Pisa.), – 1965. – P. 9-130.
- 5) Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю., Коссова С.А., Щука С.А. Модификация опресненных вод на шельфе моря Лаптевых: связь изотопных параметров и солености // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – №1. – С. 3–19.

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ БЕРИЛЛИЯ-7 В ЧЕРНОМ МОРЕ

Кременчуцкий Д.А.¹, Гуров К.И.¹, Гурова Ю.С.¹, Бежин Н.А.²

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь ²ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, г. Севастополь

Ключевые слова: бериллий-7, вертикальное распределение, Черное море, коэффициент распределения, морская взвесь.

Бериллий-7 – природный радионуклид космогенного происхождения. Он является удобным трассером в исследовании особенностей временной изменчивости вертикального обмена в морской среде на временных интервалах от синоптического до сезонного [1]. Натурные данные о содержании бериллия в водах Черного моря сильно ограничены [2], сведения о сезонной изменчивости его вертикального распределения отсутствуют вовсе. Цель настоящей работы заключается в получении количественных характеристик сезонной изменчивости вертикального распределения бериллия-7 в деятельном слое вод Черного моря.

Натурные данные были получены в ходе зимнего (2022 г.) и летнего (2023 г.) рейсов НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»). Пробы морской воды отбирались с помощью насоса и закачивались в пластиковые емкости, распределенные по палубе судна. Объем единичной пробы составлял 1–2 куб. м. Разделение растворенной от адсорбированной на взвеси формах проводилось с помощью полипропиленовых картриджей с размером пор 1 мкм. Концентрирование бериллия-7 было выполнено с использованием акрилового волокна, модифицированного гидроксидом железа (III). В общей сложности было отобрано и обработано 64 пробы морской воды с 23 станций. В береговой лаборатории фильтр и сорбенты озолялись, зола упаковывалась в пластиковые виалы. Активность бериллия в золах определялась на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) колодезного типа (кристалл диаметром и высотой по 100 мм, колодец диаметром 30 мм и высотой 60 мм, разрешение по пику цезия-137 – 7 %), помещенного в низкофоновую свинцовую защиту.

Установлено наличие сезонной изменчивости концентрации бериллия в поверхностном слое вод Черного моря. Так, зимние и летние значения концентрации отличаются примерно в 2 раза: повышенные значения характерны для летнего сезона, пониженные – для зимнего. Вероятней всего, такая изменчивость обусловлена сезонной вариацией глубины перемешивания: в зимний сезон она максимальна, в летний – минимальна. В глубоководной части моря концентрация бериллия на взвеси обычно не превышает 10 %, в прибрежной зоне до половины его активности обнаруживается на взвеси. Общее содержание радионуклида в прибрежной и глубоководной частях моря различается в 2–3 раза. Вследствие относительно небольшого периода полураспада этого радионуклида (~53 дня) вертикальный профиль его концентрации во все сезоны подобен профилю температуры: максимальные значения наблюдаются в верхнем квазиоднородном слое, в слое термоклина концентрация снижается примерно в 3 раза, в нижерасположенных слоях наблюдается экспоненциальное уменьшение его концентрации. Отмечается рост в 5–7 раз значений коэффициента распределения бериллия между растворенной и адсорбированной на взвеси формах с ростом глубины от 3 м до 70–90 м.

Исследование было проведено в рамках гранта, выданного Российским научным фондом (№ 22-77-10056).

Список литературы

- 1) Kadko, D. Upwelling and primary production during the U.S. GEOTRACES East Pacific Zonal Transect // Global Biogeochem. Cycles №2(31). 2017. P. 218–232
- 2) Kremenchutskii D. A., Batrakov G. F., Dovhyi I. I., Sapozhnikov Y. A. Role of suspended matter in controlling beryllium-7 (^7Be) in the Black Sea surface layer // Journal of Marine Systems Vol. 217. 2021. 103513

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРИЯ-234 НА СЕВЕРЕ ЧЕРНОГО МОРЯ

Кременчуцкий Д.А., Батраков Г.Ф.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: торий-234, Черное море, взвешенное вещество, пространственная изменчивость, вертикальное распределение

Торий-234 – природный радионуклид, образующийся в морской воде в результате распада урана-238. Торий представляет большой интерес в роли трассера процессов, определяющих пространственно-временную изменчивость потока взвешенного вещества в морской среде [1]. Данные о содержании тория в водах Черного моря сильно ограничены [1]. Цель настоящей работы заключается в получении количественных характеристик пространственной изменчивости содержания тория-234 в деятельном слое вод северной части Черного моря.

Натурные данные были получены в зимнем рейсе НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН») в 2022 г. Пробы морской воды отбирались с помощью насоса и закачивались в пластиковые емкости, распределенные по палубе судна. Объем единичной пробы составлял 1–2 куб. м. Разделение растворенной от адсорбированной на взвеси формах проводилось с помощью полипропиленовых картриджей с размером пор 1 мкм. Концентрирование тория было выполнено с использованием акрилового волокна, модифицированного гидроксидом железа (III). В общей сложности было отобрано 28 проб на 9 станциях. В береговой лаборатории фильтр и сорбенты озолялись, зола упаковывалась в пластиковые виалы. Активность тория в золах определялась на гамма-спектрометре со сцинтилляционным детектором NaI(Tl) колодезного типа (кристалл диаметром и высотой по 100 мм, колодец диаметром 30 мм и высотой 60 мм, разрешение по пику цезия-137 – 7 %), помещенного в низкофоновую свинцовую защиту.

По результатам исследования получено, что в поверхностном слое вод концентрация тория варьировалась в диапазоне от 4,6 до 13,5 Бк/куб. м; в среднем 23 % обнаруживалось на взвеси. Показано, что пониженное общее содержание и повышенное относительно (до 43 %) наблюдалось в прибрежной зоне, повышенное общее содержание и пониженное относительно (~13 %) наблюдалось в глубоководной части. Установлено, что рост концентрации взвеси приводит к уменьшению концентрации тория в растворенной форме ($r = -0,65$) и к росту относительного содержания тория на взвеси ($r = 0,74$). На ряде станций в диапазоне глубин 75–90 м отмечалась тенденция к росту общего содержания тория на 30–60 % относительно его концентраций на горизонте 3 м. Показано, что рост был, в большей мере, обеспечен увеличением концентрации тория на взвеси. Вероятно, это связано с поступлением радионуклида, адсорбированного на взвеси, из вышерасположенных слоев.

Таким образом показано, что имеет место пространственная изменчивость вертикального распределения концентрации тория в водах северной части Черного моря. Эта изменчивость, по-видимому, обусловлена неоднородностью поля концентрации взвеси.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FNNN-2024-0001.

Список литературы

- 1) Ceballos-Romero E., Buesseler K.O., Villa-Alfageme M. Revisiting five decades of ^{234}Th data: a comprehensive global oceanic compilation // *Earth System Science Data* №6 (14). 2022. P. 2639–2679

ОЦЕНКА РАБОТЫ АЛГОРИТМОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРЦИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

Кузьмина С.К., Лобанова П.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: парциальное давление углекислого газа в воде, дистанционное зондирование, машинное обучение, Балтийское море.

Концентрация углекислого газа (CO_2) в воде – важный параметр глобального цикла углерода в системе океан-атмосфера [1]. Полуизолированные моря, такие как Балтийское море, являются в значительной степени слабо изученным компонентом этого цикла.

Целью данного исследования является оценка парциального давления углекислого газа для вод Балтийского моря, а также связи его изменчивости с изменчивостью биологических и физических параметров среды.

Для этого в работе проанализирована пространственно-временная изменчивость парциального давления CO_2 ($p\text{CO}_2$) Балтийского моря за период с 1991 по 2021 гг.: построены сезонные карты $p\text{CO}_2$, графики сезонной и межгодовой изменчивости $p\text{CO}_2$ для всего моря, а также созданы два алгоритма восстановления $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя в Балтийском море с помощью регрессионного алгоритма машинного обучения и оценена их работа.

Для анализа использованы переменные 1) доступные дистанционно: спутниковые данные цвета океана из базы Ocean Colour Climate Change Initiative, версия 6.0 (OC CCI) [2]: данные концентрации хлорофилла-а (mg m^{-3}) пространственной дискретностью 4×4 км, временной – 8 дней; а также 2) судовые данные Surface Ocean CO_2 Atlas (SOCAT) [3]: значения $f\text{CO}_2$, переведённые в $p\text{CO}_2$, а также значения температуры и солёности поверхностного слоя океана.

Величина $p\text{CO}_2$ в Балтийском море имеет значительные сезонные колебания. Как правило, в весенние и летние месяцы преобладают условия с низким (недонасыщенным) содержанием $p\text{CO}_2$ (300-350 мкатм). Однако высокие значения $p\text{CO}_2$ (до 500-600 мкатм) в этот период могут наблюдаться в районе стока рек: Ботнический, Финский и Рижский заливы. В осенние и зимние месяцы наблюдаются условия перенасыщения, т.е. высокие значения $p\text{CO}_2$ до 700 мкатм. Низкие значения $p\text{CO}_2$ (ниже 400 мкатм) в этот период характерны для Датских проливов. Полученные результаты подтверждают предыдущие исследования [4, 5]. Авторы объясняют это 1) сезонным ходом продуктивности мористой части акватории: в период активного цветения значения $p\text{CO}_2$ (как и CO_2 , потребляемого при фотосинтезе) низкие, в то время как в осенне-зимние месяцы значения $p\text{CO}_2$ как правило высокие; а также 2) изменчивостью температуры поверхности моря: чем выше температура, тем ниже растворимость CO_2 в воде, и наоборот.

Межгодовая изменчивость среднего по акватории $p\text{CO}_2$ в Балтийском море характеризуется преобладанием поглощения CO_2 из атмосферы в океан: во все годы, кроме 1991-2001 и 2013 гг., наблюдалось поглощение акваторией CO_2 с разницей между $p\text{CO}_{2(\text{океан})}$ и $p\text{CO}_{2(\text{атм})}$ до 200 мкатм.

Алгоритм машинного обучения многослойный персептрон (MLP) был использован для построения регрессионных алгоритмов восстановления $p\text{CO}_2$: алгоритма, использующего только физические входные параметры (температура и солёность поверхностного слоя океана), и алгоритма, использующего также концентрацию хлорофилла-а. Анализ работы алгоритмов показал, что физический алгоритм обладает меньшей точностью относительно *in situ* ряда, чем биологический алгоритм (коэффициент корреляции 0,49 и 0,66, коэффициент детерминации 0,24 и 0,43, абсолютная процентная ошибка 16% и 7% соответственно). При этом оба алгоритма имеют меньшую

изменчивость, чем *in situ* ряд: среднеквадратическое отклонение (СКО) для физического алгоритма – 62,39 мкатм, для биологического алгоритма – 73,13 мкатм, для *in situ* выборки для каждого алгоритма – 124,71 и 112,14 мкатм соответственно.

Таким образом, в работе проанализирована пространственно-временная изменчивость $p\text{CO}_2$, а также предложены алгоритмы восстановления значений $p\text{CO}_2$ на основе данных, доступных дистанционно. Преимущество предложенных алгоритмов – возможность дистанционного прогнозирования $p\text{CO}_2$ в будущем на основе значений биологических и гидродинамических моделей.

-

Список литературы

- 1) Gruber N., Clement D., Carter B.R., Feely R.A., van Heuven S., Hoppema M., Ishii M., Key R.M., Kozyr A., Lauvset S.K., Lo Monaco C., Mathis J.T., Murata A, Olsen A, Perez FF, Sabine CL, Tanhua T, Wanninkhof R. The oceanic sink for anthropogenic CO₂ from 1994 to 2007 //Science. – 2019. – Т. 363. – №. 6432. – С. 1193-1199.
- 2) Sathyendranath, S., Brewin, R.J.W., Brockmann, et al. An ocean-colour time series for use in climate studies: the experience of the ocean-colour climate change initiative (OC-CCI) //Sensors. – 2019. – Т. 19. – №. 19. – С. 4285.
- 3) Bakker, D.C.E., Pfeil, B., Landa, C.S., et al. A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT), Earth Syst. Sci. Data, 8, 383–413. – 2016.
- 4) Wesslander K. The carbon dioxide system in the Baltic Sea surface waters. – Department of Earth Sciences; Institutionen för geovetenskap, 2011.
- 5) Zhang, S.; Rutgersson, A.; Philipson, P.; Wallin, M.B. Remote sensing supported sea surface pCO₂ estimation and variable analysis in the Baltic Sea //Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – №. 2. – С. 259.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ ИМПЕРАТОРСКОГО ХРЕБТА В 2019 ГОДУ, ТИХИЙ ОКЕАН

Курносова А.С.

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» ("ТИНРО"), г. Владивосток

Ключевые слова: гидрохимия, биогенные вещества, растворенный кислород, Тихий океан, Императорский Хребет, подводные горы.

Подводные горы широко распространены в Мировом океане как отдельные геологические образования, так и в виде цепи вершин океанических подводных хребтов. Императорский Хребет – система поднятий океанического дна, располагающаяся в северной части Тихого океана, протяженностью около 1500 км в меридиональном направлении. Для района подводных гор характерно наличие сложной и изменчивой вихревой структуры гидрофизических полей [1, 2]. С целью выявления различий гидрохимических условий над подводными вершинами гор Коко, Лира, Одзин, Дзингу, Нинтоку, Суико в северной части Тихого океана были проанализированы данные двух экспедиций 2019 г. в весенний и летний период на НИС «Профессор Кагановский» и НИС «Академик Лаврентьев» в районе Императорского Хребта. Сбор гидрологической информации в экспедициях осуществляли с помощью гидрологического комплекса Sea Bird Electronics model 25 и Carousel Deck Unit model 33. Зондирование весной проводилось до 1000 м, летом до 2700 м. Гидрохимический анализ по определению концентраций минеральных форм биогенных веществ (μM) и растворенного кислорода (мл/л) в воде выполнялся в судовой лаборатории по стандартным методикам [3].

Наибольшие значения температуры и солености были зафиксированы в южной части исследованной акватории. В весенний период над г. Коко максимальные значения температуры составляли $17,31^\circ\text{C}$, значения солености $34,54\text{‰}$. В летний период в этом же районе значения температуры увеличились до $24,42^\circ\text{C}$, максимальные значения солености на поверхности в этом районе составляли $34,94\text{‰}$. Минимальные значения температуры и солености наблюдались в северной части исследованной акватории: весной над вершиной горы Дзингу – $11,31^\circ\text{C}$ и $34,28\text{‰}$; летом – над вершиной горы Суико – $10,11^\circ\text{C}$ и $32,83\text{‰}$. В весенний период значения температуры в придонных слоях обследованных вершин варьировали от $3,15 - 3,31^\circ\text{C}$ (при глубинах 800-1000) до $3,76 - 4,74^\circ\text{C}$ (при глубинах 640-800), значения солености варьировали в диапазоне $34,08 - 34,37\text{‰}$. В летний период максимальные глубины обследования достигали 2000 м, значения температуры на этом горизонте составляли от $1,65$ до $1,92^\circ\text{C}$, значения солености – от $34,32$ до $34,61\text{‰}$.

Весной диапазон концентраций исследуемых параметров на поверхности был следующим: растворенный кислород от $5,44$ до $6,23$ мл/л (при насыщении от 97 до 108 %), фосфаты от $0,07$ до $0,60$ μM , растворенный кремний от $6,2$ до $15,9$ μM , нитратный азот от $0,99$ до $10,24$ μM и нитритный азот от $0,26$ до $0,64$ μM . Летом концентрации биогенных веществ на поверхности варьировали: растворенный кислород от $4,10$ до $7,36$ мл/л (со степенью насыщения от 80 до 116 %), фосфаты от $0,01$ до $1,16$ μM и растворенный кремний от $0,07$ до $31,52$ μM .

Содержание биогенных веществ в верхнем слое, расположенном в пределах верхних 200 м в океане, напрямую свидетельствует о характере первичной продуктивности. В среднем в южной части исследуемой акватории, над вершиной г. Коко, концентрации биогенных веществ в верхнем 200 м слое были ниже, чем над остальными вершинами. Концентрации повышались с увеличением широты, причем заметные различия наблюдались как весной, так и летом. Весной над вершинами Лиры, Одзина и Дзингу концентрации биогенных веществ в фотическом слое были в среднем в 1,5 - 2 раза выше, чем над Коко. Летом был заметен значительный широтный перепад: концентрации

фосфатов и растворенного кремния над г. Нинтоку были в 2 раза выше, а над г. Суико почти в 5 раз выше, чем над Коко и Дзингу.

С увеличением глубины значения растворенного кислорода естественным образом уменьшаются. Весной минимальные концентрации были отмечены на горизонте 1000 м (3,27 мл/л при насыщенности 13 %). Во время летней съемки минимальные концентрации кислорода (0,65-1,1 мл/л при степени насыщения 8 - 13 %) были зафиксированы на глубинах 1000 - 1300 м. Далее с увеличением глубины значения кислорода возрастали, достигая 1,18 – 2,04 мл/л на глубине 2000 м при насыщении 15 – 26 %. Концентрации биогенных веществ увеличивались с глубиной, и весной максимальные значения были зафиксированы на самых больших глубинах исследований. Так, весной на глубине 1000 м средние концентрации были следующими: фосфаты $\sim 2,53 \mu\text{M}$, растворенный кремний $\sim 120,6 \mu\text{M}$, нитритный азот $\sim 0,25 \mu\text{M}$, нитратный азот $\sim 37,47 \mu\text{M}$. Летом на глубинах 2000-2500 м средние концентрации составляли: фосфаты $\sim 2,67 \mu\text{M}$ и растворенный кремний $\sim 169,9 \mu\text{M}$.

В целом, по всем измеренным химическим параметрам над подводными горами наблюдались широтные различия, обусловленные различием субарктических и субтропических вод, разделенных Субарктическим фронтом, пересекающим Императорский хребет. Воды над г. Коко отличались самой низкой концентрацией биогенных веществ в фотическом слое и высоким содержанием растворенного кислорода с пересыщением, что указывает на активный фотосинтез с интенсивным поглощением биогенных веществ, по сравнению с другими подводными вершинами.

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Тихоокеанского филиала ФГБНУ «ВНИРО» ("ТИНРО")

Список литературы

- 1) Дарницкий В.Б. К истории исследования подводных гор Тихого океана (океанологические процессы) // Известия ТИНРО, 2005. Т.141. Р. 255-283.
- 2) White, M., Bashmachnikov, I., Arístegui, J. and Martins, A. Physical Processes and Seamount Productivity. In Seamounts: Ecology, Fisheries & Conservation (eds T.J. Pitcher, T. Morato, P.J.V. Hart, M.R. Clark, N. Haggan and R.S. Santos). 2007. <https://doi.org/10.1002/9780470691953.ch4>
- 3) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: Изд-во ВНИРО, 2003. 202 с.

ОСОБЕННОСТИ РАЗГРУЗКИ СУБМАРИННЫХ ГРУНТОВЫХ ВОД В ЧАУНСКОЙ ГУБЕ (ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)

Леусов А.Э., Чаркин А.Н., Красиков В.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: грунтовые воды, Арктика, разгрузка грунтовых вод, Восточно-Сибирское море.

Разгрузка субмаринных грунтовых вод (СГВ) - явление, которое способно существенно влиять на гидрологические, гидрохимические и гидробиологические режимы прибрежных морских районов [1]. В то же время, вопрос о наличии разгрузки субмаринных грунтовых вод в восточно-арктических морях России долгое время был дискуссионным, по причине повсеместного распространения субмаринных многолетнемерзлых пород, являющихся криогенными водоупорами. Обнаружение в 2015 году в юго-западной части моря Лаптевых зоны разгрузки СГВ [2] поставило вопрос о наличии данного явления в других морях Восточной Арктики. Изучение этого вопроса и является целью данного исследования. В качестве предполагаемого района разгрузки была выбрана Чаунская губа, в которой еще с середины прошлого века отмечались уникальные теплолюбивые биоценозы с нетипичным видовым разнообразием для данного района Арктики [3].

В октябре 2020 года в Чаунскую губу была организована экспедиция на НИС «Академик Опарин» с комплексом гидрологических, гидрохимических, геохимических, геологических, геофизических и гидробиологических работ. Было обнаружено несколько мест разгрузки с относительно высокой температурой воды, большой активностью в ней естественных радионуклидов радия и высокой концентрацией растворенных металлов. Кроме того, с помощью геомагнитных исследований на южном участке акватории Чаунской губы была выделена положительная магнитная аномалия сублинейного простирания сз-юв, предположительно интрузивного происхождения, послужившая источником тепла для грунтовых вод в осадочной толще над ней. Данное обстоятельство позволило предположить о гидротермальном генезисе СГВ. Это предположение также подтверждается данными $\delta^{18}\text{O}$ и δD , отношение которых в придонном горизонте в местах разгрузки схоже со значениями, отмечаемыми для холодных гидротерм в Италии и Иране [4,5]. Было установлено, что изотопное отношение $\delta^{18}\text{O}$ в местах разгрузки было облегчено, в то время как содержание дейтерия соответствовало морскому источнику. Данная деталь на фоне высокой солёности говорит о том, что данные воды по своему происхождению являются морскими и вероятнее всего поступают в губу с глубоководных районов Восточно-Сибирского моря. Возможным механизмом их поступления может быть конвективная циркуляция морских вод, которые просачиваясь в зоне питания на Восточно-Сибирском шельфе севернее входа в залив, поступают в реакционную зону над магматическим очагом и далее в результате нагрева становятся чрезвычайно плавучими и поднимаются на поверхность дна Чаунской губы.

Авторы, ранее исследовавшие Чаунскую губу, связывали факт высокой продуктивности и биоразнообразия с особенностями климатического и гидрологического режима водоема [6]. Однако обнаружение на акватории губы гидротермальных источников позволяет предположить, что именно наличие зон разгрузки теплых грунтовых вод явилось фактором, определившим богатство и своеобразие видового состава, и высокую продуктивность этого водоема.

Таким образом, уникальное сочетание вулканогенных структур, мощного потока соленых подземных вод, поставляющих тепло и питательные вещества в частично замкнутую акваторию, привело к возникновению и длительному сохранению уникального "арктического оазиса", служащего убежищем для разнообразных биологических сообществ, включающих бореальные виды, не встречающиеся в других районах Арктики за пределами регионов, испытывающих сильное влияние атлантических или тихоокеанских вод.

Список литературы

- 1) Moore, W.S. Sources and fluxes of submarine groundwater discharge delineated by radium isotopes / W.S. Moore // *Biogeochemistry*. – 2003. – 66. – P. 75–93.
- 2) Charkin, A.N. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: A case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea. / A.N. Charkin, M.R. Loeff, N.E. Shakhova [et. al.] // *The Cryosphere*. – 2017. – 11. – P. 2305-2327.
- 3) Филатова, З.А. Зоогеографическое районирование северных морей по распространению двустворчатых моллюсков / З.А. Филатова // *Труды института океанологии*. – 1957. – Т. 23. – С. 195-215.
- 4) Ферронский, В.И. Изотопия гидросферы Земли / В.И. Ферронский, В.А. Поляков. - М.: Научный мир, 2009. - 632 с.
- 5) Bahadori, D. Variations of stable oxygen and hydrogen isotope ratios in the cold and thermal springs of the Bazman volcanic area (in the southeast of Iran) / D. Bahadori, R. Jahanshahi, V. Dehghani, S. Mali // *Environ. Earth Sci.* – 2019. – 78. – P. 663.
- 6) Экосистемы и фауна Чаунской губы и сопредельных вод Восточно-Сибирского моря: Сб. науч. тр. / [Ред. А.Н.Голиков]. – СПб.: ЗИН, 1994. – 150 с.

СЕЗОННЫЕ И СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ГАЗОВОГО ПОТОКА ЧЕРНОМОРСКИХ МЕЛКОВОДНЫХ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ И ИХ СРЕДООБРАЗУЮЩАЯ РОЛЬ НА ПРИМЕРЕ СИПОВ В БУХТЕ ЛАСПИ

Малахова Т.В.¹, Будников А.А.², Краснова Е.А.², Иванова И.Н.², Хурчак А.И.¹

¹Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,
г. Севастополь

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: метановые сипы, пассивная гидроакустика, углеводородный состав, изотопный состав, растворенный кислород, средообразующая роль

Естественная субмаринная газовая разгрузка широко распространена на континентальном шельфе. Различают флюидные и пузырьковые просачивания (сипы), которые чаще всего представлены метаном. Выделяющийся газ может иметь различный генезис, что влияет на интенсивность и периодичность сипов. Определение точного объема выделяющегося газа и факторов, влияющих на параметры газового потока, необходимо для оценки вклада сипов в глобальный бюджет метана.

В 2023 г. впервые были проведены межсезонные и круглосуточные исследования вариаций интенсивности и периодичности пузырьковых газовыделений и их средообразующей роли на мелководной площадке сипов в бухте Ласпи (Черное море). По данным компонентного и изотопного анализа газ отвечает условиям термokatалитического преобразования органического вещества с незначительным вкладом бактериального изотопнолегкого газа ($C_1/C_{2+} < 100$; $\delta^{13}C-CH_4 - -36.0 \pm 2.4\%$ и $\delta^{13}C-C_2H_6 - -37.5 \pm 0.5\%$; $n=38$).

Для измерения гидрологических, гидрофизических параметров и одновременной записи акустических сигналов, генерируемых сипом, использовался комплекс измерительных приборов, включавший: 1) многопараметрические измерители RCM 9 LW и RDSP 600 (AANDERAA INSTRUMENTS, Норвегия); 2) широкополосный гидрофон АБТМ-23 3) подводную видеокамеру для фото- и видеосъемки GoPro 9 с разрешением 4К; 4) скоростной логгер давления и температуры RBR-duet (Канада).

Анализ акустических данных и видеоматериалов показал наличие пузырькового потока на площадке сипов во все месяцы наблюдений 2023 года (с февраля по ноябрь). Для проведения исследований был выбран точечный источник пузырькового газа из каменистого основания, имеющего характерный рельеф, что позволило в различные сезоны выполнять все измерения в одной и той же точке. Показано, что интенсивность и периодичность пузырьковых газовыделений достоверно отличались между сезонами. В феврале, апреле и октябре пузырьки из источника выходили небольшими группами (кластерами), продолжительность которых составляла в среднем 4 – 18 с, паузы между кластерами составляли от одной до 17 секунд. В мае, июне и августе наблюдались более продолжительные кластеры, максимальное время непрерывного истечения пузырей достигало 1 час 55 мин, а максимальная пауза между кластерами в июне составила 8 мин 23 сек. Диаметр одного пузырька в кластере, оцененный по характеристикам записанных акустических сигналов [1, 2] и верифицированный по данным видеозаписей, составил 6 мм. На основании данных по периодичности газовыделений и размеров пузырьков рассчитан объем выделившегося газа для каждой отдельной серии измерений: в феврале – 27 л/сут, в мае – 26 л/сут, в июне – 36 л/сут, в августе – 37 л/сут, в октябре – 31 л/сут.

Проведен анализ гидролого-гидрофизических данных с зондов RCM, RDSP, датчика давления RBR. Получены временные ряды величин температуры, электропроводности, давления, содержания растворенного в воде кислорода, мутности и горизонтальной составляющей скорости потока

морской воды в придонном слое над точкой газовыделений. В ходе наблюдений отмечены как синхронные, так и асинхронные изменения температуры и содержания растворенного кислорода над сипом. С учетом температуры и солености воды рассчитан процент насыщения воды кислородом в точке над газовыделениями, который был в среднем на 9,2 % ниже по сравнению с фоновыми значениями.

Таким образом, показано влияние газовыделений на содержание растворенного кислорода в морской среде, находящейся во взаимодействии с сипом. В совокупности с другими процессами, которые могут сопровождать газовыделение, это может приводить к формированию в непосредственной близости от сипа среды с отличающимися от фона гидрологическими свойствами. Так например сипам может сопутствовать субмаринная пресноводная разгрузка, которая приводит к изменению температуры и солености в зоне выхода. Сильнее всего описанные средообразующие эффекты должны проявляться в придонных слоях при условиях слабого течения и незначительного вертикального перемешивания.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00379, <https://rscf.ru/project/23-27-00379>

Список литературы

- 1) Будников А.А., Малахова Т.В., Иванова И.Н., Линченко Е.В. Применение пассивного акустического метода для детектирования и оценки потоков мелководных пузырьковых газовыделений // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2019(6): С. 107-13.
- 2) Minnaert M. On musical air-bubbles and the sounds of running water // Philosophical Magazine and Journal of Science 16.104. 1933. P. 235-248.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

Малыгин Е.Ю., Курносова А.С.

Тихоокеанский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» ("ТИНРО"), г. Владивосток

Ключевые слова: гидрохимия, Тихий океан, растворенный кислород, биогенные элементы

Гидрохимические параметры являются важными показателями состояния акватории. Известно, что содержание растворенного кислорода в Мировом океане за последние 50 лет снизилось на 2 %, вследствие глобального потепления [1]. В некоторых регионах концентрации биогенных элементов в фотическом слое снижаются, а в глубинных слоях увеличиваются вследствие уменьшения глубины перемешивания из-за повышения температуры поверхностного слоя океана [2]. В северо-западной части Тихого океана (СЗТО) кислород в промежуточный слой поступает через Южные Курильские проливы [3], поэтому анализ содержания растворенного кислорода и биогенных элементов в этом районе является актуальной задачей. Целью настоящей работы стало выявление межгодовой изменчивости гидрохимических параметров в СЗТО. Для этого по результатам 10 экспедиционных исследований, выполненных на НИС "Профессор Кагановский" и НИС "ТИНРО" в летний период (июнь) с 2014 по 2023 годы был рассмотрен разрез, выполненный вдоль Курильских островов. Лабораторный анализ гидрохимических параметров был выполнен в судовой лаборатории по стандартным методикам [4]. Всего было проанализировано 106 станций, 626 определений растворенного кислорода, кремния и фосфатов, все полученные данные были линейно проинтерполированы на стандартные горизонты.

В поверхностном слое содержание растворенного кислорода в среднем находилось в пределах 7.50–8.50 мл/л, на горизонте 50 м динамика изменения среднего содержания растворенного кислорода, в целом, соответствует ситуации в поверхностном слое, с диапазоном концентраций 6.40–8.50 мл/л. На горизонте 200 м отмечена тенденция к уменьшению содержания кислорода: от ~5.15 мл/л (2014 г.) до ~3.94 мл/л (2020 г.), но затем отмечено увеличение, и в 2023 г. содержание достигало 5.05 мл/л. На горизонтах 500 м и 1000 м концентрация растворенного кислорода была максимальной в 2014 г. и составила 2.62 мл/л и 1.3 мл/л соответственно. Минимум на горизонте 500 м и 1000 м составлял 1.07 мл/л и 0.57 мл/л соответственно и отмечался в 2019–2020 гг. Однако в 2023 г. уровень содержания растворенного кислорода составил 1.57 мл/л на 500 м и 0.77 мл/л на 1000 м.

Содержание растворенного кислорода на разрезе вдоль Курильской гряды в СЗТО за рассмотренный период хоть и имеет отдельные ярко выраженные скачки максимума, в целом имеет тренд на убывание. Причем этот тренд прослеживается на всех рассмотренных горизонтах, однако наиболее четкое проявление деоксигенации отмечается в слоях 500 м и 1000 м. Общий тренд на понижение кислорода в фотическом слое -0.03 мл/л в год, а на горизонтах 500 м и 1000 м он составляет -0.06 мл/л в год.

Средняя концентрация кремния в поверхностном слое варьировала в диапазоне 9–23 μM , на горизонте 50 м – от 34 до 54 μM . Динамика изменения концентрации на этих горизонтах нередко находилась в противофазе: например, в то время как на поверхности концентрация составляла ~22.9 μM (2017 г.) и ~28.9 μM (2018 г.), на горизонте 50 м концентрации в среднем составляли ~41.9 μM (2017 г.) и ~34.9 μM (2018 г.). На горизонте 200 м средняя концентрация кремния отмечалась в пределах 57–83 μM , на горизонтах 500 м и 1000 м изменялись в широком диапазоне 81–124 μM и 114–166 μM соответственно.

Среднее значение концентрации растворенного кремния имело наиболее высокие межгодовые вариации среди рассмотренных параметров, однако, несмотря на ежегодные скачки, общий тренд

направлен на увеличение концентрации. На горизонтах от 0 до 500 м среднее значение тренда составляет $1.30 \mu\text{M}$ в год, и $2.07 \mu\text{M}$ в год на горизонте 1000 м.

Среднее значение концентрации фосфатов в поверхностном слое менялось в диапазоне $0.90\text{--}1.66 \mu\text{M}$, на горизонте 50 м значение находилось в пределах $1.63\text{--}2.19 \mu\text{M}$, максимум отмечался в 2022 г., минимальные значения были зафиксированы в 2019 - 2020 гг. На горизонте 200 м значение концентрации фосфатов составляло $2.21\text{--}2.86 \mu\text{M}$, минимум отмечался в 2016 и в 2020 г. На горизонтах 500 м и 1000 м отличия в концентрации фосфатов выражены слабее, чем в вышележащих слоях, диапазон концентраций составил $2.65\text{--}3.32 \mu\text{M}$ на 500 м и $2.72\text{--}3.46 \mu\text{M}$ на 1000 м. Было выявлено, что в 2022 г. среднее значение концентрации фосфатов на горизонте 500 м оказалось больше чем на горизонте 1000 м, вероятно это обусловлено особенностью рельефа дна в районе разреза, выполненного в 2022 г., а именно - наличием впадин с глубинами порядка 550-750 м, в которых может происходить накопление биогенных элементов.

В целом, в концентрации фосфатов тренд на увеличение отмечается не на всех горизонтах: на горизонте 50 м и 200 м тренд составляет $0.04 \mu\text{M}$ в год и $0.02 \mu\text{M}$ в год соответственно.

Таким образом, выявленные особенности межгодовой изменчивости гидрохимических параметров в СЗТО согласуются с общей концепцией деоксигенации Тихого океана, связанной прежде всего с уменьшением продуцирования плотных шельфовых вод Охотского моря, которые в процессе склоновой конвекции “вентилируют” нижележащие слои вод, выходящие в Тихий океан через Курильские проливы [3].

Работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Тихоокеанского филиала ВНИРО ("ТИНРО").

Список литературы

- 1) Schmidtko, S., Stramma, L., Visbeck, M. Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades // Nature, № 542. 2017. P.335–339 <https://doi.org/10.1038/nature21399>
- 2) Boyce D.G., Lewis M.R., Worm B. Global phytoplankton decline over the past century // Nature, № 466. 2010. P. 591–596.
- 3) Зуенко Ю.И., Фигуркин А.Л., Матвеев В.И. Современные изменения продукции промежуточных вод в Охотском море и их показателей // Известия ТИНРО, Т. 193, 2018. С. 190-210.
- 4) Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана / под ред. В.В. Саложникова. М. : ВНИРО, 2003. 202 с.

ПАРЦИАЛЬНОЕ ДАВЛЕНИЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОДАХ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

Мукошеев И.Н., Медведев Е.В., Орехова Н.А., Гуров К.И.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Ключевые слова: pH, pCO₂, общая щелочность, кокколитофориды, кислород

В последние десятилетия антропогенное влияние на гидрохимические характеристики и состояние морских экосистем становится более значимым. Кроме того, непрерывное увеличение концентрации атмосферного CO₂ за счет антропогенной деятельности и вклада природно-климатических факторов так же способствует изменению характеристик поверхностного слоя вод [1].

Это проявляется, прежде всего, в увеличении содержания биогенных элементов в водах, увеличении потока органического вещества, снижении концентрации кислорода и, как следствие, увеличении частоты случаев развития гипоксии, смещения равновесий и трансформации карбонатной системы, увеличении концентрации CO₂ и снижении pH [2]. Это определяет актуальность исследования современного состояния и, в частности, карбонатной системы морских экосистем.

Целью данной работы было изучить состояние карбонатной системы (pH, общая щелочность, pCO₂) поверхностного слоя (1 метр) вод северной части Черного моря в летний период, когда наблюдается повышенная температура поверхностного слоя вод, развивается стратификация водной толщи и изменяется поток органического вещества за счет продукционно-деструкционных процессов с участием органического вещества.

Для анализа использованы данные полученные на НИС «Профессор Водяницкий» в конце весеннего и летний гидрологические периоды (июнь-июль) 2017-2023 годов в северной части Черного моря включая шельфовый (ограничен изобатой 200 метров) и глубоководный районы.

В исследуемый период парциальное давление CO₂ изменялось от 430 до 570 мкатм. Отмечено, что в летний период повышение концентрации CO₂ поверхностного слоя вод сопровождается снижением pH и концентрации кислорода. Это объясняется тем, что повышение температуры и развитие плотностной стратификации в летний период способствует увеличению скорости биохимических процессов, таких как окисление органического вещества в результате деструкции первичной продукции, и смещению системы карбонатных равновесий в сторону накопления CO₂. Величина pH изменялась от 8,2 до 8,5 ед. pH.

Установлена взаимосвязь pCO₂ и щелочности, которая показывает рост последней при увеличении CO₂. Это происходит из-за избытка CO₂, который вызывает смещение равновесия в сторону образования HCO₃⁻, что и приводит к росту общей щелочности. Величина общей щелочности в исследуемый период изменялась в пределах 3175 до 3375 мкмоль/л.

При снижении pH происходит уменьшение концентрации CO₃²⁻ за счет их перехода в HCO₃⁻. Выведенные из реакции ионы CO₃²⁻ смещают равновесие в сторону растворения карбонатов, что так же способствует увеличению общей щелочности, до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие.

По полученной зависимости можно сказать, что, в целом, в летний период значения pCO₂ растут с увеличением температуры за счет увеличения интенсивности биохимических процессов деструкции первичной продукции.

Значения pH, полученные в ходе 95-го рейса значительно отличаются от средних значений изучаемой величины, характерных для исследуемого района в летний период. Отклонение в сторону кислой среды напрямую связано с аномальным цветением кокколитофорид летом 2017 года. Оно объясняется тем, что ионы HCO₃⁻ используются кокколитофоридами. Связывая их с ионами

кальция при формировании карбонатного скелета кокколитофориды выводят ионы H^+ из клетки для поддержания внутриклеточного рН.

Сравнивая данные, полученные в 2017 году с данными в остальные годы, очевидно насколько сильное влияние оказывает цветение кокколитофорид на равновесие карбонатной системы, так изменение (снижение) величины рН по сравнению с другими рейсами в среднем составило 0,1 ед. рН в тоже время количество кокколитофорид составляло 8000000 клеток/л., что в 4 раза больше, чем наблюдалось в другие годы.

Проанализировав влияние количества кокколитофорид в 2017 году на pCO_2 , рН и O_2 , можно заключить, что увеличение их количества ведет к значительному снижению CO_2 , потребляемого при фотосинтезе, и производству кислорода. Также наблюдается локальный для данного периода рост рН за счет снижения концентрации CO_2 в воде.

С учетом полученных данных рН (8,394 (СКО = 0,05) в 2019 г., 8,331 (СКО = 0,026) в 2021 г., 8,302 (СКО = 0,032) в 2023 г.) стоит отметить, что в последние четыре года исследований наблюдается внутрисезонное (в летний период) снижение средних значений величины рН от 8,394 \pm 0,05 ед. рН в 2019 году до 8,302 \pm 0,032 ед. рН. Более низкие значения рН 8,256 \pm 0,026 ед. рН можно объяснить аномальным цветением кокколитофорид. Снижение в период 2019-2023 гг. может быть связано с увеличением антропогенной нагрузки в Черном море, которая приводит к подкислению морской воды.

Данные получены в рейсах НИС «Профессор Водяницкий» (Центр коллективного пользования «НИС Профессор Водяницкий» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»).

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ (тема «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO_2 в морской среде Черного и Азовского морей» FNNN-2022-0002)

Список литературы

- 1) Хоружий Д.С., Кондратьев С.И., Медведев Е.В., Шутов С.А. Динамика парциального давления углекислого газа и концентрации растворенного кислорода в шельфовых водах Южного берега Крыма в 2009 – 2010 г. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа № 21. 2010. С. 136-145
- 2) Sulpis O., Boudreau B. P., Mucci A., Jenkins C., Trossman D.S., Arbic B.K., Key R.M. Current $CaCO_3$ dissolution at the seafloor caused by anthropogenic CO_2 // Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 115, № 46. 2018. P. 11700-11705

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Муратова А.А.^{1,2}, Полухин А.А.¹, Пронина Ю.О.¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

Ключевые слова: общая щелочность, рН, гидрохимия, Балтийское море.

Неорганические соединения углерода в морской среде составляют общую карбонатную систему океана. Система состоит преимущественно из угольной кислоты и ее производных, которые связаны между собой. Увеличение концентрации ионов водорода в морской воде (иначе говоря, асидификация океана или понижение водородного показателя рН) происходит вследствие смещения равновесий в карбонатной системе. Карбонатная система морских вод играет важную роль в химии океана, и является основной буферной системой вод. Этот буфер регулирует водородный показатель и, таким образом, препятствует закислению вод, влияя на многие биохимические и геохимические процессы [1].

Распределение общей щелочности и рН изучалось в течение четырех сезонов: зимнего — 91-ый рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (10–28.12.2022) и 55-ый рейс НИС «Академик Борис Петров» (09.12.-24.12.2023), весеннего — 55-ый рейс ПС «Академик Сергей Вавилов» (20–26.04.2023) и 53-ий рейс НИС «Академик Борис Петров» (07–27.05.2023), летнего — выходы на маломерных судах в период с 06.07.2023 по 13.09.2023 и осеннего — выходы на маломерных судах в период с 20.10.2023 по 11.11.2023, а также 54-ый рейс НИС «Академик Борис Петров» (12.11.-26.11.2023). Пробы воды для определения элементов карбонатной системы отбирали гидрологическим комплексом Hydrobios MWS 12 Slimline, оснащенным батометрами Нискина. Соленость и температура измерялись многоканальными гидрофизическими зондами Sea&Sun Technology CTD 48Mc и SAIV SD208. Отбор и анализ проб производился по стандартным методикам, принятым в отечественной практике [2].

На глубоководных станциях в открытой части юго-восточной Балтики в вертикальном распределении общая щелочность изменялась от поверхности ко дну в зимний период от 1640 до 1840 мкмоль/л в 2022 году и от 1688 до 1856 мкмоль/л в 2023 году, в весенний период от 1584 до 1800 мкмоль/л в апреле и от 1656 до 1840 в мае, в осенний период от 1684 до 1876 мкмоль/л соответственно. В поверхностном слое наблюдались локальные отклонения от классического распределения в некоторых сезонах. В весенний период общая щелочность в слое от поверхности до галоклина (50-70 м) уменьшалась на 40-136 мкмоль/л, в зимний период в слое 0-45 м уменьшалась на 16-40 мкмоль/л, глубже этих горизонтов равномерно повышалась с соленостью.

По результатам измерений в декабре 2022 года и в апреле 2023 года было обнаружено наличие растворенного сероводорода в придонном слое на глубине 90 м, оторванные от дна на 15 м, за счет чего на этом горизонте щелочность резко увеличивается на 80-100 мкмоль/л, относительно выше и ниже лежащего горизонтов.

На станциях вдоль побережья наблюдалась инверсия значений, щелочность уменьшалась от поверхности ко дну. В декабре 2022 года от 1740 до 1720 мкмоль/л, в весенний от 2584 до 1712 мкмоль/л, в летний от 1968 до 1824 мкмоль/л.

Годовой ход рН в фотическом слое характеризуется низкими значениями в осенне-зимний период (в среднем 8 ед. шкалы NBS), высокими значениями в весенний период (до 8.54 ед. шкалы NBS) и максимальными значениями в летний период (9.07 ед. шкалы NBS), что связано с интенсивным

потреблением CO_2 в ходе фотосинтеза, в частности в мае и июле наблюдались максимальные значения на поверхности, которые соответствуют сезонным максимумам фитопланктона и первичной продукции [3]. Ниже фотического слоя и до галоклина рН понижается из-за восполнения CO_2 за счет накопления и минерализации органического вещества [4], после чего происходит более плавное понижение рН до глубины 80 м в зимний сезон до 7.1, в весенний до 6.81, в осенний до 7.15 ед. шкалы NBS. Ниже 80 м рН может незначительно увеличиваться за счет адвекции вод глубинного слоя на 0.1-0.2 ед. шкалы NBS.

Таким образом, при сравнении данных за четыре сезона, можно предположить, что определяющим фактором сезонных изменений общей щелочности в поверхностном слое является динамика речного стока с более высокой щелочностью, а на изменчивость щелочности в придонном горизонте оказывает влияние гидросульфидная составляющая, при наличии сероводорода щелочность резко увеличивается. Изменения рН в фотическом слое связано с интенсивным потреблением CO_2 в ходе фотосинтеза.

Исследования на станциях экологического мониторинга ФНТП выполнены в рамках госзадания БФУ им. И. Канта №FZWM-2023-0004, исследования на станциях стандартной сетки отбора в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список литературы

- 1) Алекин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 343 с.
- 2) Современные методы гидрохимических исследований океана / Ред. Бордовский О.К., Чернякова А.М. М.: ИО АН СССР, 1992. С.70-85.
- 3) Кудрявцева Е. А., Александров С. В., Дмитриева О. А. Сезонная изменчивость первичной продукции и состава фитопланктона в береговой зоне российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря //Океанологические исследования. – 2018. – Т. 46. – №. 3. – С. 99-115.
- 4) Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том 03. Балтийское море. Выпуск 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Справочник. // СПб: Гидрометеиздат, 1994. — 435 стр.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА

Муратова А.А.^{1,2}, Полухин А.А.¹, Пронина Ю.О.¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

²Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград

Ключевые слова: общая щелочность, рН, гидрохимия, Балтийское море.

Карбонатная система морских вод играет важную роль в химии океана и является основной буферной системой вод. Этот буфер регулирует водородный показатель и таким образом препятствует закислению вод, влияя на многие биохимические и геохимические процессы. Финский залив считается слабобуферным (низкощелочным) бассейном и относится к прибрежным регионам с самой высокой сезонной и межгодовой изменчивостью рН и общей щелочностью [1] за счет вклада речных вод с низкой соленостью из районов, где коренная порода водосборных бассейнов мало обогащена известняками [2].

Распределение элементов карбонатной системы в восточной части Финского залива изучалось в течение трех сезонов: зимнего — 91-ый рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (декабрь 2022) и 55-ый рейс НИС «Академик Борис Петров» (декабрь 2023), весеннего — 55-ый рейс ПС «Академик Сергей Вавилов» (апрель 2023) и 53-ий рейс НИС «Академик Борис Петров» (май 2023), а также осеннего — 54-ый рейс НИС «Академик Борис Петров» (ноябрь 2023). Пробы воды для определения рН и общей титруемой щелочности отбирали гидрологическим комплексом Hydrobios MWS 12 Slimline, оснащенный батометрами Нискина. Соленость измерялась многоканальными гидрофизическими зондами Sea&Sun Tech CTD 90 и Idronaut Ocean 316. Отбор и анализ проб производился по стандартным методикам, принятым в отечественной практике [3].

В зимний сезон наблюдался маловыраженный градиент общей щелочности и рН, который обусловлен снижением интенсивности речного стока из-за ледостава на р. Нева. Концентрации щелочности изменялись от устьевой части к мористой от 1020 до 1380 мкмоль/л и от 1052 до 1376 мкмоль/л в 2022 и 2023 годах соответственно. В вертикальном распределении концентрации общей щелочности на исследуемом участке достигали максимальных величин в самой глубоководной открытой части Финского залива — 1610 (2022 г.) и 1684 мкмоль/л (2023 г.) на глубинах 60 и 64 м соответственно.

В весенний сезон граница влияния речного стока значительно увеличилась в сравнении с полученными результатами. В мае область влияния речного стока достигала максимума. В устьевой части были зафиксированы минимальные значения щелочности за все исследуемые сезоны — 720 мкмоль/л.

Осенью граница распространения речного стока отступала к устьевой части, где значения общей щелочности повышались относительно весеннего сезона на 110 мкмоль/л, достигая значений 840 мкмоль/л. В осенний период в открытой части залива были зафиксированы максимальные значения щелочности (1792 мкмоль/л) за все исследуемые сезоны, которые отклонялись от классического распределения общей щелочности для северной части Балтийского моря. Максимальные концентрации оторваны от дна на 5 м. В придонном горизонте концентрации общей щелочности ниже вышележащего горизонта отбора на 188 мкмоль/л (1604 мкмоль/л). Данная неоднородность в вертикальном распределении связана с наличием следовых концентраций растворенного сероводорода (0.06-0.08 мг/л).

В весенний сезон наблюдается повышение значений рН относительно зимнего сезона к апрелю в среднем на 0.5 рН ед. шкалы NBS, после чего к маю увеличивается еще на 0.8 рН ед. шкалы NBS. В осенний сезон рН уменьшается относительно значений в мае на 1.3 рН ед. шкалы NBS, что также совпадает с средними значениями зимнего сезона.

На исследуемом разрезе восточной части Финского залива хорошо прослеживалась зона влияния речного стока из Невской губы, которая формирует две главные тенденции распределения общей щелочности и рН: увеличение общей щелочности и уменьшение рН от устьевой части к открытой, а также возрастание концентраций общей щелочности и уменьшение значений рН с увеличением глубин.

В распределении щелочности и рН наблюдалась выраженная сезонность, в восточной части Финского залива сток Невы определяет концентрации общей щелочности. В осенне-зимний период по мере сокращения речного стока и соответствующим повышением солености возрастает и щелочность, помимо этого с усилением вертикального перемешивания происходит повышение щелочности за счет обмена с глубинными водами. И наоборот, в весенне-летний период с увеличением речного стока понижается соленость, за счет чего понижается и щелочность.

На изменчивость щелочности в придонном горизонте также оказывает влияние гидросульфидная составляющая. При наличии сероводорода щелочность резко увеличивается, скачок концентраций сохраняется до разрушения анаэробных условий.

Исследования на станциях экологического мониторинга ФНТП выполнены в рамках госзадания БФУ им. И. Канта №FZWM-2023-0004, исследования на станциях стандартной сетки отбора в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0025).

Список литературы

- 1) Carstensen J., Duarte C. M. Drivers of pH variability in coastal ecosystems // *Environmental Science & Technology*. – 2019. – No. 53. – №. 8. – P. 4020-4029.
- 2) Hjalmarsson S. Wesslander, K., Anderson, L. G., Omstedt, A., Perttilä, M., Mintrop, L. Distribution, long-term development and mass balance calculation of total alkalinity in the Baltic Sea // *Continental Shelf Research*. – 2008. – No. 28. – №. 4-5. – P. 593-601
- 3) Бордовский О. К., Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана // М.: ИО РАН, 1992. – 200 с

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ОБСКОГО ЭСТУАРИЯ

Мурзакова Ю.В., Костылева А.В., Полухин А.А.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Карское море, речной сток, Обская губа, гидрохимия, биогенные элементы.

На структуру вод Карского моря в значительной степени влияет материковый сток, на 82% представленный водами Оби и Енисея [1]. Зоны смешения река-море являются уникальной частью экосистемы ввиду особенностей химического состава вод как материкового, так и морского генезиса. В последние десятилетия наблюдается ряд климатических изменений, оказывающих на Арктический регион значительное влияние. Таким образом, исследование гидрохимических характеристик, которые могут служить индикаторами климатических изменений, является фундаментальной задачей.

Данная работа посвящена исследованию особенностей распределения гидрохимических параметров и растворенного органического углерода в северной части Обской губы. В основе работы лежат данные, полученные при проведении гидролого-гидрохимических съемок в ходе экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре 2007 года (54-ый рейс), в июле-августе 2016 года (66-ой рейс), в июле 2019 года (76-ой рейс), а также на НИС «Профессор Штокман» в сентября 2013 года (125-ый рейс) и в августе 2014 года (128-ой рейс). Всего гидрохимические определения в экспедициях ИО РАН проводились на 69 гидрологических станциях, выполненных с 2007 по 2019 гг.

В работе было проанализировано распределение температуры, солености, основных биогенных элементов (кремний, формы минерального азота, фосфаты), кислорода, щелочности, АОУ (Apparent Oxygen Utilization - кажущееся потребление кислорода) и РНУ (растворенный неорганический углерод). Основные гидрохимические параметры определялись в соответствии со стандартными методами [2]. На основе имеющихся данных были определены минимальные, максимальные и медианные значения всех исследуемых параметров. Анализ данных выполнен с помощью программы Grapher17 и Surfer20.

За рассмотренный интервал времени мощность распресненного слоя с соленостью менее 25 составляла от 10 до 20 метров. Величина щелочности увеличивалась с уменьшением влияния речного стока, на разрезах варьировала от 0,2 до 2,8 mM. Концентрация кремния в исследуемом районе изменялась от аналитического нуля до 270 μM , достигая максимальных значений в речной части разреза в 2019 году. Концентрация кремния достигала максимума в речных водах на всех разрезах, кроме 2013 года, когда максимальные концентрации наблюдались у дна на границе морских и речных вод, где мог протекать процесс реминерализации органического вещества, оседающего в зоне маргинального фильтра [3]. Содержание аммонийного азота изменялось от 0 до 24 μM . Максимальное значение было зафиксировано в 2019 году в зоне геохимического барьера в области смешения морских и речных вод. Концентрация фосфора увеличивалась с глубиной и по направлению к приустьевой зоне (0,1 – 3,2 μM). Величина АОУ отражает преобладание в экосистеме продукционных или деструкционных процессов [4]. В исследуемый период значения АОУ менялись от -80 до 360, на большей части всех разрезов величина принимала положительные значения. Наибольшая изменчивость данного параметра была отмечена в 2014 году. Положительные значения данного параметра и высокие значения степени насыщения кислородом у дна могут свидетельствовать о процессах разложения органического вещества.

Медианные значения солености в значительной степени отличались от года к году, минимальные значения – 2013 и 2014 год, когда по поверхности разреза не были достигнуты морские воды.

Общая щелочность обладала меньшей амплитудой изменчивости, в Обской губе минимальные значения были отмечены в 2013 году, а максимальные – в 2019. Наибольшие концентрации кремния были определены в 2013 году. Минимальная степень насыщения кислородом (80%) наблюдалась в 2019 году в Обской губе, в этот год активно происходило окисление органического вещества, содержание нитритного азота достигало максимума по сравнению с другими годами. Высокое содержание нитратов также отмечалось в 2007 и 2014 годах, при этом медианные значения кислорода в эти годы выше 90%. В 2016 году в Обской губе можно отметить пониженное содержание всех форм азота, а также фосфатов. В этот год в Обской губе наблюдалась самая высокая продукционная активность за период исследования. Наименьшее содержание нитритов наблюдалось в 2013 году в обских водах одновременно с максимумом содержания аммонийного азота.

Рассматриваемые в данной работе гидрохимические параметры, сохраняя общие закономерности распределения, обладают, однако, высокой пространственной и временной изменчивостью, что может обуславливаться сочетанием множества факторов, влияющих на формирование гидрохимической структуры вод северной части Обского эстуария. К подобным факторам относится изменчивость речного стока, активность фитопланктона, интенсивность продукционно-деструкционных процессов, которые в свою очередь сильно зависят от сезона. Изучение трансформации химического стока в устьевой области Оби крайне важно для понимания формирующих экосистему Карского моря биохимических процессов, а также для оценки антропогенной составляющей при изучении отклика арктических экосистем на климатические изменения, к которым относятся увеличение срока безлёдного периода, повышение температуры воздуха в Арктике и увеличение речного стока.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОРАН (тема № FMWE-2024-0021).

Список литературы

- 1) Полухин А.А., Маккавеев П.Н. Особенности распространения материкового стока по акватории Карского моря // *Океанология*. 2017. Т.57. №1. С. 25–37.
- 2) Руководство по химическому анализу морских вод. РД 52.10.242-92. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 264 с
- 3) Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // *Океанология*. 1994. Т. 34, № 5. С. 735–747.
- 4) Костылева А.В., Мошаров С.А. Перспективы использования расчетов кажущегося потребления кислорода для оценки продукционно-деструкционных процессов в водных экосистемах (на примере северо-восточной части Черного моря) // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2017. №. 1. С. 59-65.

ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВОД И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В КУРШСКОМ И ВИСЛИНСКОМ ЗАЛИВАХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2023 Г.

Александров С.В.^{1,2}, Найданов Д.А.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Калининград

²Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, г. Калининград

Ключевые слова: биогенные элементы, хлорофилл «а», трофическое состояние, Вислинский залив, Куршский залив.

Вислинский и Куршский заливы Балтийского моря относятся к крупнейшим лагунным экосистемам мира и характеризуются повышенным уровнем эвтрофирования вод [1]. Эти водоемы и их водосборные территории расположены в густонаселенных районах с развитыми сельским хозяйством и промышленностью. В Куршский залив основной сток поступает с р. Неман - одной из крупнейших рек Балтийского моря, несущей биогенные элементы со значительной территории Литвы и Беларуси. В Вислинский залив основной сток поступает с р. Преголя, собирающей биогенные элементы с территории Калининградской области и Польши. На Вислинский залив загрязняющее влияние оказывает расположение на прилегающей территории Калининградской агломерации. Несмотря на ввод в 2016 г. новых очистных сооружений г. Калининграда, концентрации биогенных элементов в Вислинском заливе сохраняются на высоком уровне из-за их многолетней аккумуляции [2,3].

Вислинский и Куршский залив представляют собой мелководные водоемы (в среднем 2,7 и 3,8 м), для которых характерна сезонная динамика гидрологических и гидрохимических показателей, определяющих развитие планктона. Летний период характеризуется активной вегетацией фитопланктона, прежде всего синезеленых водорослей, которое может достигать уровня «цветения» воды в условиях высокого прогрева воды [4].

Целью работы было изучение гидрохимических условий и оценка трофического состояния Вислинского и Куршского заливов в период летнего «цветения» вод.

Период гидрологического лета, для которого характерен наибольший прогрев вод (до 20° и выше), наблюдается в июле – середине сентября, как следствие, отбор проб был выполнен в Куршском заливе 5-6 июля 2023 г. на 8 станциях и в Вислинском заливе 8 сентября 2023 г. на 6 станциях, охватывающих основную российскую акваторию заливов. Пробы отбирали в подповерхностном слое (0-0,5 м) и у дна (3-4 м). Гидрохимические исследования выполнялись стандартными методами. Хлорофилл «а» определялся согласно ГОСТ 17.1.04.02-90.

В летний период происходит активное потребление минеральных форм биогенных элементов, вследствие чего наблюдается их сезонный летний минимум в воде. В Куршском заливе концентрации нитратного и нитритного азота составляли в среднем 16 и 5 мкгN/л, а в Вислинском заливе – 20 и 4 мкгN/л. На большинстве станций концентрации нитратного азота не превышали 10-20 мкгN/л и нитритного азота – 5 мкгN/л. На фоновом уровне резко выделяется станция в Вислинском заливе у устья р. Преголя, рядом с выпуском очистных сооружений Калининграда, где концентрации нитратного азота резко увеличивались до 67-73 мкгN/л и нитритного азота – 30 мкгN/л. Аналогичная ситуация наблюдалась для фосфора фосфатов, концентрации которого в Куршском заливе на большинстве станций не превышали 5-10 мкгP/л (в среднем 6 мкгP/л), а в Вислинском заливе – 5-20 (с среднем 29 мкгP/л). Однако у устья р. Преголя, концентрации фосфора фосфатов резко увеличивались до 155 мкгP/л у поверхности и 65 мкгP/л у дна. Такое пространственное распределение подтверждает предыдущие исследования [3] о загрязнении и эвтрофировании восточного района Вислинского залива из-за поступления биогенов с стоком р. Преголи и со сточными водами Калининграда.

В Куршском заливе повышенные концентрации фосфора фосфатов (10-20 мкгР/л по сравнению со средним по остальной акватории 4 мкгР/л) также отмечены в устье р. Неман, из-за вероятного поступления с водосборной территории.

При относительно низких концентрациях нитратного и нитритного азота, для заливов был характерен очень высокий уровень концентрации аммонийного азота (в среднем 44 мкгN/л в Вислинском заливе и 115 мкгN/л в Куршском заливе). Высокие концентрации аммонийного азота в этих водоемах обычно не связаны с антропогенным загрязнением и характерны в период и после «цветения» воды за счет минерализации синезеленых водорослей.

Летом (июль-сентябрь) в период наибольшего прогрева высокие концентрация минерального фосфора создают условия для «цветения» синезеленых водорослей [4]. Хлорофилл «а» - основной фотосинтетический пигмент фитопланктона, который является показателем обилия фитопланктона и важнейшим индикатором трофического статуса вод.

Концентрации хлорофилла «а» в Куршском заливе были 19 - 62 мкг/л, в среднем 41 мкг/л. Выраженного пространственного и вертикального распределения не наблюдалось. Отмечен относительно невысокий уровень развития фитопланктона, относительно многолетних данных [6]. Летом 2023 г. концентрации хлорофилла «а» были ниже уровня «гиперцветения» вод (< 75 мкг/л) и в целом соответствовали эвтрофному состоянию.

В Вислинском заливе, напротив, была значительная пространственная и вертикальная изменчивость хлорофилла «а» в диапазоне 15-220 мкг/л. Максимальная концентрация наблюдалась локально в восточном районе в поверхностном слое (220 мкг/л), а у дна она снижалась до 40 мкг/л из-за поверхностного «гиперцветения» синезеленых водорослей. «Гипертрофный» уровень по хлорофиллу «а», обусловленный массовым развитием синезеленых водорослей, может вести к комплексу неблагоприятных последствий. В западной части Вислинского залива у морского пролива концентрация хлорофилла «а» многократно снижалась (до 17-26 мкг/л), под влиянием взаимодействия с морем, улучшающего экологическое состояние вод. Полученные в 2023 г. данные в целом соответствуют многолетним закономерностям гидрохимических условий и эвтрофирования вод в Куршском и Вислинском заливах [1,3].

В рамках темы госзадания № FMWE-2024-0025 "Эволюция ключевых природных комплексов Атлантического океана и Балтийского моря: современное состояние и палеореконструкции".

Список литературы

- 1) Александров С.В. Современное экологическое состояние и загрязнение Куршского и Вислинского заливов Балтийского моря // Вода: химия и экология. 2011. № 11(41). С. 3–9.
- 2) Александров С.В., Горбунова Ю.А. Биогенная нагрузка на Вислинский залив со стоком реки Преголя // Вода: химия и экология. 2010. № 1(19). С. 4–8.
- 3) Сташко А.В., Александров С.В. Пространственное распределение и сезонная динамика гидрохимических условий в Вислинском заливе Балтийского моря в 2020-2022 гг // Океанологические исследования. 2023. Т. 51, № 1. С. 71–90.
- 4) Александров С.В. Влияние климатических изменений на уровень эвтрофирования Куршского залива // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. № 1. С. 49–57.

ОСОБЕННОСТИ ШИРОТНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ПРИВОДНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В ИНДИЙСКОМ СЕКТОРЕ ЮЖНОГО ОКЕАНА В ДЕКАБРЕ 2022 – ФЕВРАЛЕ 2023 ГГ.

Перцовская В.К.¹, Иванов Б.В.^{1,2}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: диоксид углерода, приводный слой атмосферы, Южный океан, широтная изменчивость.

Мировой океан представляет собой крупнейший резервуар углерода на планете, его запасы в 50 раз превосходят запасы атмосферы, при этом между ними существует постоянный процесс газообмена, являющегося одним из элементов океанского углеродного цикла [1]. Южный океан играет огромную роль в этом цикле, на его долю приходится около 40% диоксида углерода антропогенного происхождения, поглощаемого Мировым океаном [2]. Концентрация CO₂ в приводном слое атмосферы является одной из характеристик, описывающих поток углерода между атмосферой и океаном. Таким образом изучение этого показателя и выявление закономерностей и особенностей в его широтных изменениях является необходимым условием для проведения комплексного анализа многолетних наблюдений и выявления устойчивых трендов.

Основанием для данной работы послужила база данных [3], сформированная участниками экспедиции из материалов, полученных в результате натуральных измерений концентрации диоксида углерода и основных метеорологических характеристик в антарктических водах. Наблюдения проводились в декабре 2022 года - феврале 2023 года в период работ 67-й Российской Антарктической экспедиции на борту НЭС «Академик Федоров» по ходу судна, на разрезе от Кейптауна до станции Молодежная и далее в моря Космонавтов, Дейвиса и Содружества. Стоит отметить, что получение наиболее репрезентативных значений начинается после 45° ю.ш., до этого наблюдались значительные пропуски, обусловленные нестабильной работой блока питания газоанализатора, что было устранено именно после прохождения 45° ю.ш. Измерения концентраций CO₂ производились российским газоанализатором ОПТЭК-500.4-CO₂ (стационарный анализатор диоксида углерода в атмосферном воздухе, конструкции ООО ОПТОГАЗ, Санкт-Петербург, Россия) с дискретностью 10 минут.

Был выполнен критический анализ, обработка и обобщение содержащихся в базе данных материалов с последующей визуализацией полученных результатов в среде MATLAB. Показано, что основным трендом пространственного изменения концентрации CO₂ является уменьшение значений концентрации с увеличением широты (при движении в сторону Антарктиды) от 368 ppm у берегов Африки до минимума в 355 ppm на границе плавучих льдов. Основной причиной таких изменений может являться понижение температуры поверхностного слоя воды, что обуславливает увеличение ее (воды) поглотительной способности [4], а также активный процесс фотосинтеза, характерный для момента проведения измерений (летний сезон), что, в свою очередь, способствует стоку CO₂ в океан [5, 6]. В ходе работы было отмечено влияние положения основных фронтальных зон Южного океана [7] на характер пространственного изменения концентрации CO₂. Максимальные значения концентрации CO₂ наблюдались в районе Южного фронта (371 ppm). После его прохождения зафиксировано устойчивое понижение значений концентрации диоксида углерода до 368 ppm. При этом, начиная с 55° ю.ш., устойчивое понижение двуокиси углерода в приводном слое атмосферы можно связать с отсутствием масштабных фронтальных зон на остатке пути, обуславливающих аномалии биопродуктивности и, как следствие, процессов фотосинтеза. Стоит отметить, что с 40° по 50° ю.ш. наблюдались периодические повышения концентрации диоксида углерода, связанные с ростом температуры воды.

Список литературы

- 1) Малинин В.Н., Образцова А.А., Изменчивость обмена углекислым газом в системе океан-атмосфера // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2011. № 4. С. 220–226.
- 2) Elizabeth H. Shadwick, Cathryn A. Wynn-Edwards, Richard J. Matear, Peter Jansen, Eric Schulz, Adrienne J. Sutton, Observed amplification of the seasonal CO₂ cycle at the Southern Ocean Time Series [Электронный ресурс] // Frontiers: [сайт]. [2023]. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2023.1281854/full> (дата обращения: 31.12.2023)
- 3) «Данные измерений концентрации двуокиси углерода в приземном слое воздуха в водах Восточной Антарктики в период 68 РАЭ, 2023 г.» (ANTARCTICA). Свидетельство о государственной регистрации базы данных за № 2023623935 от 13.11.2023 г.
- 4) Егоров Н.И. Физическая океанография. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. 456 с.
- 5) Yingxu Wu, Di Qi, The controversial Southern Ocean air-sea CO₂ flux in the era of autonomous ocean observations // Science Bulletin. 2023. Vol. 68, iss. 21. Pp. 2519-2522. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095927323006151?via%3Dihub> (дата обращения 31.12.2023)
- 6) Карлин Л.Н., Малинин В.Н., Гордеева С.М., О влиянии температуры поверхности океана на обмен углекислым газом с атмосферой // Океанология. 2015. Т. 55, № 1. С. 16–25.
- 7) Океанография и морской лед. - М.: Paulsen. 2011. 432 с.

СТРУКТУРА ВОД И ПОТОК УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА У ГРАНИЦЫ СЕЗОННОГО ЛЬДА В КАРСКОМ МОРЕ

Пронина Ю.О., Полухин А.А., Муравья В.О.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: карбонатная система, поток углекислого газа, гидрохимия, изменение климата, весенний сезон, Карское море.

Мировой океан считается основным природным резервуаром, способным поглотить избыточный углекислый газ из атмосферы. Поглощающая способность природных вод зависит от многих факторов: состояния карбонатной системы вод, концентрации CO_2 в воде и атмосфере, скорости ветра в приводном слое атмосферы, температуры, фотосинтетической активности, объема материкового стока и других [1–3]. При этом акватория Северного Ледовитого океана наиболее всего подвержена влиянию глобальных климатических изменений [4]. Весенний сезон в Арктике длится приблизительно с апреля по июнь. Именно в это время в акватории арктического бассейна по разным оценкам создается до 50–54% годовой интегральной для столба воды первичной продукции (ИПП) [5]. Всплеск фотосинтетической активности, наряду с низкими температурами создают особенно благоприятные условия для активного поглощения углекислого газа арктическими водами в весенний сезон, что важно учитывать при оценках поглощающей способности как акватории всего Северного Ледовитого океана, так и его окраинных морей. Карское море – это шельфовое арктическое море. Основным фактором, определяющим структуру его вод, является поступающий материковый сток [6].

Основной задачей данного исследования является оценка потока углекислого газа у границы схода сезонного льда в Карском море, поскольку до настоящего времени подобных исследований не проводилось. Для расчета параметров карбонатной системы и оценки потоков CO_2 использовались данные, полученные в 83 рейсе НИС «АМК». Работы проводились в весенний сезон с 22 по 30 июня 2021 г. Была исследована акватория западной части моря протяженностью более 1000 км. Всего на разрезе было выполнено 9 станций, расположенных вдоль кромки тающего сезонного льда. Расчет потоков углекислого газа (F_{CO_2}) проводился на основе квадратичной – $F^2_{\text{CO}_2}$ [2] и кубической – $F^3_{\text{CO}_2}$ [3] параметризаций, с использованием равновесного $p\text{CO}_2$ в воде и $p\text{CO}_2$ в атмосфере, а также скорости ветра в приводном слое (с часовым осреднением). Расчет параметров карбонатной системы, включая равновесное $p\text{CO}_2$ в воде, производился в программе CO2sys с использованием измеренной карбонатной пары – pH (NBS) и общей щелочности (Alk). Определение гидрохимических характеристик проводилось на борту судна согласно стандартным методикам.

Значения температуры в поверхностном слое менялись от -1,5 до 1,6 °C, солености (Sal) в пределе от 30 до 33 епс. На большей части разреза отмечено воздействие на поверхностный слой опреснения, вызванного таянием морского льда, о чем свидетельствует $\text{Sal} \sim 32\text{--}33$ епс. Выделяется самая северная часть разреза, где на станциях 7021 и 7023 была зафиксирована Sal 30–31 епс, что позволяет предположить присутствие здесь материковых вод. Общая щелочность поверхностных вод изменялась от 2230 μM в области трансформированного речного стока (ст. 7021) до 2293 μM , pH от 8,19 до 8,36, с максимумом pH 8,36 на станции 7019. На юге на станции 7016 во всей толще вод выделяется область пониженных значений pH (8,00 – 8,20). Поверхностный минимум pH – 8,19 ед. был зафиксирован на ст. 7021 в области предположительного влияния речного стока.

Расчет показал, что значения равновесного парциального давления $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод Карского моря были существенно ниже атмосферного $p\text{CO}_2$ на всех станциях разреза и характеризовались значительной изменчивостью в пределе от 211 до 330 ppm. Средние за час значения парциального давления CO_2 в атмосфере составили от 409 до 414 ppm. Это определило отрицательные значения потока на всех станциях разреза (из атмосферы в воду). Минимум $p\text{CO}_2$ в воде

был отмечен в центральной части разреза на ст. 7019. Анализ показал, что на этой станции значения интегральной в столбе воды первичной продукции ИПП были максимальными и достигали 1352 мгС/м^2 в день. Максимум $p\text{CO}_2$ в воде был зафиксирован в южной части разреза на ст. 7016, где ИПП была существенно ниже – 505 мгС/м^2 [5].

Одним из основных параметров, влияющим на интенсивность обмена газов с водой, является скорость ветра [2, 3]. Период исследования характеризовался невысокими среднечасовыми значениями скорости ветра – от 1,2 до 8,0 м/с при среднем 4,2 м/с. По разным оценкам в период наблюдений интенсивность потока CO_2 через границу вода-атмосфера изменялась в пределах от -0,04 до -23,61 ммоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$, при средних значениях - 4,92⁽³⁾ и -7,09⁽²⁾ ммоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$ (здесь и далее индекс (2) означает, что расчет проведен с использованием квадратичной, (3) – кубической параметризации ветра). Минимальные значения потока наблюдались при минимальных значениях скорости ветра на самой северной станции разреза 7023 и составляли от - 0,04⁽³⁾ до -0,31⁽²⁾ ммоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$. Максимальные значения потока соответствовали максимальному значению скорости ветра на ст. 7017 и достигали -21,43⁽³⁾ и -23,61⁽²⁾ ммоль/ $\text{м}^2 \cdot \text{сут}$.

Структура вод исследованной акватории моря соответствует весеннему состоянию, наблюдается поверхностный прогретый слой в южной части моря. Опреснению в результате таяния льда подвержена южная и центральная часть разреза, в северной части опреснение поверхностного слоя усилено материковым стоком. Основными факторами, определяющими направление потока CO_2 , являются общая биологическая активность, материковый сток и температура воды. Интенсивность потока CO_2 определяется скоростью ветра. На всей исследованной части акватории наблюдается инвазия (поглощение) углекислого газа из атмосферы.

Работа выполнена в рамках госзадания ИОРАН FMWE-2023-0002.

Список литературы

- 1) Takahashi T., Sutherland S.C., Sweeney C., et al. Global sea-air CO_2 flux based on climatological surface ocean $p\text{CO}_2$, and seasonal biological and temperature effects // Deep Sea Res., Part II. – 2002. – vol. 49. – № 9–10. – P. 1601–1622.
- 2) Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean revisited // Limnology and Oceanography: Methods. – 2014. – vol. 12. – № 6. – P. 351–362. DOI: <https://doi.org/10.4319/lom.2014.12.351>
- 3) Wanninkhof R., McGillis W.R. // Geophys. Res. Lett. – 1999. – V. 26. – P. 1889–1892.
- 4) Richter-Menge, J., M. L. Druckenmiller, and M. Jeffries, Eds., 2019: Arctic Report Card 2019. – Режим доступа: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
- 5) Демидов А. Б. и др. Первичная продукция и хлорофилл размерных групп фитопланктона Карского моря в период схода сезонного льда // Океанология. – 2022. – Т. 62. – №. 3. – С. 403-415.
- 6) Polukhin A. The role of river runoff in the Kara Sea surface layer acidification and carbonate system changes // Environmental Research Letters. – 2019. – Т. 14. – №. 10. – С. 105007.

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПРИДОННЫХ ВОД В КАНАЛЕ ВИМА

Селиверстова А.М., Зуев О.А., Чульцова А.Л.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: канал Вима, придонные воды, гидрохимия, биогенные элементы, кислород.

Антарктическая донная вода (ААДВ) – самая холодная и плотная в Мировом океане, и занимает большую часть океанского ложа. Из-за гигантского объема ААДВ самые незначительные изменения ее свойств могут иметь глобальные климатические последствия. Наиболее интенсивные процессы в данном слое происходят в многочисленных глубоководных узких каналах и разломах. Среди них канал Вима, соединяющий Аргентинскую и Бразильскую котловины Атлантического океана, являющийся одним из самых важных и хорошо изученных [1]. Несмотря на это, подробного исследования гидрохимических параметров в нем до сих пор не проводилось, имеются лишь отдельные станции на разрезах с низким горизонтальным разрешением. Между тем представляется интересным увидеть изменения не только гидрологической структуры, но и гидрохимических параметров, что даст возможность увидеть дополнительные особенности в поведении ААДВ в канале Вима. Как известно растворенный кислород и кремний являются отличными маркерами ААДВ [2], нами же были подробно рассмотрены также нитраты и фосфаты, с целью в дальнейшем иметь возможность определять границы ААДВ не только по потенциальной температуре, но и по гидрохимическим параметрам.

Гидрохимические работы в 87 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на выходе из канала Вима велись с 03.03.2022 по 06.03.2022. Нами впервые был выполнен поперечный разрез с юго-востока на северо-запад состоящий из 13 комплексных станций, пробы воды отбирались с глубин от 3800 м до дна. Станции 7412-7415 расположены непосредственно в канале Вима (глубины 4476-4767 м), станции 7417-7426 – к северо-западу от канала (глубины от 4223 м на крайней станции разреза до 4505 м на станции, ближайшей к каналу). Велось определение таких показателей, как растворенный кислород (O₂), водородный показатель (рН), общая титруемая щелочность (Alk), растворенный кремний (SiO₂), фосфатный (или минеральный) фосфор (P-PO₄), минеральные формы азота нитратов (N-NO₃) и нитритов (N-NO₂) по методикам, принятым в отечественной гидрохимии [3].

Сравнивая северо-западные и юго-восточные станции, можно выделить следующие особенности: для большинства гидрохимических параметров экстремумы находятся на глубоководных станциях, расположенных в канале. На горизонте 3800 м юго-восточных станций отмечен максимум содержания растворенного кислорода (5,47-5,58 мл/л, 71-72% насыщения), максимум величины рН (7.94-7.96), минимум общей щелочности (2418-2429 μ M), а также минимумы растворенного кремния (57,94 μ M), фосфора (1,60 μ M) и нитратов (23,74 μ M). В придонных же горизонтах станций 7412-7415 отмечены минимумы величины рН (7.83-7.84), максимум общей щелочности (2455 μ M), а также максимумы растворенного кремния (125,16 μ M), фосфора (2,25 μ M), азота нитратов (32,86 μ M) и нитритов (0,17 μ M). Северо-западные станции разреза, за счет их относительной мелководности не имеют ярко выраженных локальных увеличений или уменьшений величин гидрохимических параметров, все показатели изменяются ко дну согласно классическим представлениям.

Распределение химических параметров на выходе из канала Вима показывает, что глубина верхней границы Антарктической донной воды уменьшается от восточной части разреза к западной. Это соответствует характерному наклону изолиний потенциальной температуры и солености. ААДВ имеет сравнительно невысокое содержание кислорода, величины рН и повышенное – растворенного фосфора, кремния и нитратов. Максимумы и минимумы химических параметров хорошо согласуются с минимальными значениями потенциальной температуры и максимальными ско-

ростями течений [4]. Изменения значений большинства гидрохимических параметров (увеличение кремния, фосфора, нитратов и уменьшение кислорода) глубже 4000-4100 м резко уменьшаются, что также соответствует слабой стратификации придонных вод.

Сравнивая гидрохимические и гидрофизические параметры, можно отметить хорошую их сходимость в пространственном распределении, несмотря на сравнительно более низкое разрешение первых относительно вторых. Для нахождения более подробных закономерностей зависимости гидрохимических параметров от гидрологической структуры вод необходимо проанализировать большее количество данных. Это даст возможность лучше понять, как пространственную, так и временную изменчивость гидрохимической структуры придонных вод, а впоследствии определить величины гидрохимических параметров ААДВ для различных глубоководных каналов Атлантики.

Анализ данных выполнен при поддержке гранта РФФ 24-27-00181

Список литературы

- 1) Zenk W., Morozov E. Decadal warming of the coldest Antarctic Bottom Water flow through the Vema Channel // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Т. 34. – №. 14.
- 2) Mantyla A. W., Reid J. L. Abyssal characteristics of the World Ocean waters // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. – 1983. – Т. 30. – №. 8. – С. 805-833.
- 3) Бордовский О. К., Чернякова А. М. Современные методы гидрохимических исследований океана // М.: ИО РАН. – 1992.
- 4) Zuev O.A., Seliverstova A.M. Antarctic Bottom Water in the Vema Channel // «All-Russian Conference of Young Scientists» COMPLEX INVESTIGATION OF THE WORLD OCEAN. – Cham : Springer Nature Switzerland, 2023. С. 198-204.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ $p\text{CO}_2$ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Соколова Е.Н.¹, Лобанова П.В.¹, Семкин П.Ю.²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: карбонатная система, парциальное давление углекислого газа, Японское море

Известно, что океан является регулятором климата Земли, и представляя собой одно из звеньев глобального цикла углерода, и поглощая около четверти ежегодно выделяемого в настоящее время антропогенного углекислого газа (CO_2) [1]. Увеличение концентрации CO_2 в воздухе приводит к «парниковому эффекту», вызывающему повышение температуры океана и его «закисление» (уменьшение рН воды). В настоящее время концентрация CO_2 в приземной атмосфере составляет около 420 ppm [2], и она продолжает расти. Обмен углеродом в системе океан-атмосфера является наиболее сложным процессом, включающим в себя несколько форм углерода и их взаимодействие с различными физико-химическими, биогеохимическими и гидрологическими параметрами. Такие процессы, как потребление CO_2 при фотосинтезе морских растений, разложение растворенного органического углерода, буферная ёмкость, определяемая общей щелочностью, могут регулировать парциальное давление углекислого газа ($p\text{CO}_2$) в воде. Мониторинг $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое океана является очень важным, в том числе и для оценки потоков CO_2 в системе океан-атмосфера.

Цель данной работы – описать пространственно-временную изменчивость $p\text{CO}_2$ в открытых водах поверхностного слоя северо-западной части Японского моря, а также определить водную толщу моря как источник или как поглотитель углекислого газа.

В исследовании использовались судовые данные для северо-западной части Японского моря (40,7°-43,8° с.ш. 130°-135,5° в.д.) предоставленные Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева, полученные в весенний и осенний сезоны на НИС «Академик М. А. Лаврентьев» в 2003 (февраль-март), 2005 (октябрь) и 2011 (октябрь-ноябрь) годах.

Величина $p\text{CO}_2$ поверхностного слоя воды (до 10 м) рассчитана на основе измеренных параметров карбонатной системы – рН и общей щелочности с использованием общеизвестной процедуры [3]. Для определения рН применяли потенциометрический метод с использованием термостатируемой ячейки без жидкостного соединения [4]. Расчёты параметров карбонатной системы производили в программе $\text{CO}_2.\text{sys}$ 3.0, реализуемой в Excel. Для них использовались константы диссоциации H_2CO_3 (K_1 , K_2) по Lueker et.al (2000), константа диссоциации HSO_4 (K_{so4}) по Dickson (1990), константа диссоциации HF (K_{HF}) по Dickson and Riley (1979).

В конце зимы-начале весны (февраль-март) до развития весеннего «цветения» фитопланктона значения $p\text{CO}_2$ в среднем по акватории были несколько выше, чем в осенний (октябрь-ноябрь) период и составили $349,9 \pm 70,37$, $318,43 \pm 25,55$, $315,40 \pm 14,48$ мкатм соответственно. В февралемарте 2003 года более низкие значения наблюдались в заливе Петра Великого и в водах Приморского течения, и увеличивались по направлению к югу и юго-востоку, достигая 501,5 мкатм. В октябре 2005 года величины $p\text{CO}_2$ были распределены более-менее равномерно по рассматриваемой акватории. В октябре-ноябре 2011 года в исследуемой области значения $p\text{CO}_2$ были распределены крайне неравномерно, наибольшее значение (378,4 мкатм) наблюдалось в водах Приморского течения.

На момент проведения измерений в 2003, 2005 и 2011 годах $p\text{CO}_2$ в воздухе составляла 370, 372 и 385 мкатм соответственно, и эти значения являются равновесными для оценки поверхностного слоя моря как источника или стока CO_2 для атмосферы. По полученным результатам расчетов карбонатной системы для исследуемых лет, предварительно можно сделать вывод, что весной 2003

года большая часть акватории являлась источником CO_2 , так как значения превышали равновесную величину (476-501,4 мкатм), а осенью 2005 и 2011 года – большая часть акватории, наоборот, поглощала атмосферный CO_2 , так как значения не превышали равновесную величину.

Таким образом, оценка пространственно-временной изменчивости pCO_2 в поверхностном слое северо-западной части Японского моря показала сезонную изменчивость, связанную с процессами фотосинтеза фитопланктона и изменяющейся температурой воды.

Список литературы

- 1) Friedlingstein et al. Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>, 2020.
- 2) The Keeling Curve // [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://keelingcurve.ucsd.edu/> (дата обращения 14/12/2023)
- 3) Dickson, A.G.; Sabine, C.L.; Christian, J.R. (Eds.) Guide to Best Practices for Ocean CO_2 Measurements; PICES Special Publication 3; PICES: Sidney, BC, Canada, 2007; 191p, Available online: <http://hdl.handle.net/11329/249> (accessed on 10 December 2023).
- 4) Tishchenko, P.; Zhang, J.; Pavlova, G.; Tishchenko, P.; Sagalaev, S.; Shvetsova, M. Revisiting the Carbonate Chemistry of the Sea of Japan (East Sea): From Water Column to Sediment. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 438.

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАБИЛЬСКОГО ЗАЛИВА (О. САХАЛИН, ОХОТСКОЕ МОРЕ) В ЛЕТНИЙ СЕЗОН 2022 Г.

Федоров М.С., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Барабанщиков Ю.А.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: Ключевые слова: гидрохимия лагуны, Набильский залив, продукционно-деструкционные процессы.

Лагуны имеют большую гидрохимическую изменчивость из-за высокой интенсивности продукционно-деструкционных процессов органического вещества (ОВ). Реки являются источником биогенных веществ и растворенного органического углерода (РОУ) [1]. Набильский залив, расположенный на Восточном Сахалине, является типичной лагуной. Гидролого-гидрохимический состав таких акваторий имеет ключевое значение для проходных и полупроходных видов рыб, особенно на стадии эмбрионального и постэмбрионального развития. В Набильском заливе обитает одна из крупных популяций *Parahucho perryi* (Brevoort, 1856), который является эндемиком Дальнего Востока и входит в «Красную книгу Сахалина» [2].

В результате двух экспедиций, проведенных 22.06.2022 г. и 06.09.2022 г., был получен широкий спектр характеристик: температура, солёность, рН, общая щёлочность, концентрация хлорофилла «а», растворённый O_2 , биогенные веществ, РОУ, а также произведён расчёт парциального давления CO_2 (pCO_2).

В ходе работ в июне температура на шельфе о. Сахалин в районе работ составляла около 1 градуса, в лагуне вода прогрелась до 18 градусов. В сентябре в этих же районах температура увеличилась до 8 и 21 градуса соответственно. Также получены значительные изменения солёности: в июне солёность в лагуне изменялась в диапазоне от 2 psu до 18 psu, при значительном восточном ветре, скорость которого составляла ≈ 8 м/с с порывами до 10 м/с. При этом, под воздействием ветра и благодаря небольшой глубине (от 0,5 м до 2 м) распреснённая вода аккумуляровалась у западного побережья лагуны. В сентябре скорость ветра составляла менее 1 м/с. При этом отмечено равномерное распределение солёности в направлении с юга на север от 3 до 26 psu. Величина рН в среднем составляла 7,8 и 7,7 в июне и сентябре соответственно. Концентрации хлорофилла «а» в июне варьировались в диапазоне от 4,5 мкг/л у устья реки Набиль до 14,5 мкг/л в центральной части залива, а концентрации растворённого кислорода от 9,4 мг/л в лагуне до 11,5 мг/л в мористой части. В сентябре максимальные концентрации хлорофилла «а» были зафиксированы в западной части акватории и составили 15,5 мкг/л, а минимальные в северной части лагуны (1мкг/л) с концентрацией O_2 от 9,4 мг/л до 6,8 мг/л соответственно. Концентрации растворённого неорганического азота (DIN) в июне находились в пределах от 0,2 мкмоль/л, в кутовой части акватории, до 7,1 мкмоль/л в мористой части, в сентябре – в пределах от 0 мкмоль/л до 13,75 мкмоль/л. Как в июне, так и в сентябре, DIN поступал в лагуну с морской водой. Концентрация фосфатов (DIP) находилась в пределах от 0 мкмоль/л до 2,3 мкмоль/л в ходе двух съёмок. Минимальная концентрация DIP наблюдалась в центральной и кутовой частях залива.

Концентрация РОУ в июне в среднем составила 4,6 мгС/л, а в сентябре практически в два раза выше 8,2 мгС/л. Согласно данным pCO_2 в июне акватория являлась стоком для углекислого газа из атмосферы, в сентябре мы получили обратную картину, на 9 из 15 станций было установлено, что лагуна является источником CO_2 для атмосферы. Это свидетельствует о доминировании деструкционных процессов в осенний период. Из особенностей можно отметить то, что в июне в лагуне практически отсутствовала высшая морская растительность, в то время как в сентябре большая площадь была покрыта *Zostera marina* L. Это может объяснить повешенную концентрацию РОУ в акватории. В процессе фотосинтеза часть органического углерода фиксиру-

ется водорослями, а после чего снова высвобождается в среду, тем самым приводя к повышению концентрации РОУ в воде [3].

В результате проделанной работы получен широкий комплекс гидролого-гидрохимических характеристик. Судя по параметрам карбонатной системы в июне в Набильском заливе доминирует продукция ОВ, а в начале сентября доминирует деструкция ОВ. Отдельное влияние на содержание РОУ оказывают морские травы *Zostera marina* L. Содержание растворённого O_2 в воде варьируется в пределах от 9,4 мг/л до 11,5 мг/л, что свидетельствует о хорошем кислородном насыщении воды. Практически полное отсутствие биогенных веществ в акватории лагуны, но при этом высокие показатели концентраций хлорофилла «а», можно объяснить тем, что биогенные вещества быстро расходуются фитопланктоном. Судя по полученным результатам в морской воде получены повышенные концентрации биогенных веществ по отношению к водам Набильского залива.

-

Список литературы

- 1) С.В. Lopes, A.I. Lillebø, P. Pato, J.M. Dias, S.M. Rodrigues, E. Pereira, A.C. Duarte. Inputs of organic carbon from Ria de Aveiro coastal lagoon to the Atlantic Ocean // Estuarine, Coastal and Shelf Science. 2008. V. 79, Iss. 4, P. 751-757
- 2) В. Н. Ефанов отв. ред. Красная книга Сахалинской области: Животные 2 изд. 2016. С. 170-171.
- 3) Hagen Buck-Wiese Mona A. Andskog Nguyen P. Nguyen Margot Bligh Eero Asmala Silvia Vidal-Melgosa Manuel Liebeke Camilla Gustafsson Jan-Hendrik Hehemann. Fucoid brown algae inject fucoidan carbon into the ocean // PNAS 2022. V.120, No. 1, P. 1-8.

КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕТАНА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 89-ГО РЕЙСА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ»

Швед В.А.^{1,2}, Егоров А.В.², Кравчишина М.Д.², Кудрявцева Е.А.², Новигатский А.Н.², Саввичев А.С.³

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

³ФИЦ Биотехнологии РАН, Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, г. Москва

Ключевые слова: растворенный метан, изменение климата, деградация многолетнемерзлых пород, метановые сипы, Карское море, Приямальский шельф, Байдарацкая губа.

На фоне возросшего внимания к проблеме изменения климата, вопрос повышения концентрации парниковых газов в атмосфере представляет очевидный научный интерес. Одним из наиболее значимых парниковых газов является метан. Считается, что, несмотря на то, что большую часть планеты занимает Мировой океан, его вклад в общем потоке метана в атмосферу не велик – всего 2% [1]. Вклад Северного Ледовитого океана в поток метана в атмосферу на данный момент является предметом дискуссий, однако, предполагается, что его роль будет расти по мере сокращения морского ледяного покрова [2]. Объектом данного исследования является Карское море, первые исследования метана в котором были проведены в 1984 году [1]. Недавние исследования показали, что общий фон эмиссии метана для морей Европейской Арктики и Карского моря лежит в пределах средних значений для всего Мирового океана [3]. В данной работе представлены новые данные о содержании растворенного метана в воде и донных осадках Карского моря, полученных в ходе 89-го рейса (1 этап) НИС «Академик Мстислав Келдыш» (5–18 сентября 2022 г.) [4].

В экспедиции было выполнено 26 станций с отбором проб для последующего определения в них растворенного метана в Байдарацкой губе, на Приямальском шельфе и на двух широтных разрезах от Приямальского шельфа до Восточно-Новоземельской впадины. Всего отобрано 122 пробы морской воды и 26 проб донных осадков, взятых из колонок мультикорера и трубки большого диаметра (ТБД – 1 станция). В качестве метода отбора проб был использован метод фазово-равновесной дегазации проб, известный как «headspace analysis» [5]. Определение концентраций метана в газовой фазе было осуществлено с помощью метода газовой хроматографии.

По предварительным результатам можно отметить, что наибольшие концентрации растворенного метана в воде были зафиксированы в Байдарацкой губе – 313 нмоль/л на глубине 32 м. На более мелководных станциях в этом районе (~15-20 м), где вертикальное перемешивание достигало дна, концентрации метана почти не менялись с глубиной и составили 140-160 нмоль/л.

На Приямальском шельфе на станциях с глубинами до 20 м также было характерно квази-однородное по вертикали распределение метана от поверхности до дна. В более глубокой части разреза (~25 м) был характерен придонный максимум метана – 189,6 нмоль/л. Кроме того, в этой части разреза была выявлена максимальная, среди прочих проб, концентрация метана в верхних горизонтах донных осадков (0-2 см), составившая 9,89 мкмоль/л.

В наиболее глубоководной исследуемой части моря – на северном и южном широтных разрезах от Приямальского шельфа до Восточно-Новоземельской впадины, распределение растворенного метана характеризуется наличием подповерхностного максимума с концентрацией до 54,3 нмоль/л. Наличие таких подповерхностных максимумов является типичным явлением для вод Карского моря, однако природа их еще не ясна [3]. Одно из возможных объяснений может быть связано со скоплением в пикноклине микроорганизмов, ответственных за процессы метаногенеза, а именно метаболическая активность аэробных гетеротрофных бактерий, разрушающих метил-фосфонат и образующих метан [6].

В исследованном районе наибольшие концентрации растворенного метана в поверхностных водах наблюдались в Байдарацкой губе и на Приямальском шельфе. Там же отмечена связь между повышенными концентрациями метана в донных осадках и в водной толще, что свидетельствует о процессе диффузии этого газа из осадков. На отдельных станциях источником высоких концентраций были метановые сипы, определенные по акустическим аномалиям в водной толще с помощью эхолотного профилирования. Одна из вероятных причин образования на дне газово-струйных выделений газа – деградация субаквальных многолетнемёрзлых пород, являвшихся флюидоупором. Повышенные концентрации метана известны для распресненных вод, связанных с Обь-Енисейским речным стоком [3]. На участках, где вертикальное перемешивание в определенных условиях достигает дна, происходит ускорение транспорта метана со дна к поверхности моря. Такое перемешивание связано и с пузырьковой разгрузкой метана со дна. Всплывающие пузыри приводят к аномалиям метана в приводном слое атмосферы. Нами было отмечено небольшое превышение концентрации метана в приводном воздухе – до 2.09 ppm [4]. Такое повышение отмечено только в области метановых сипов в Байдарацкой губе.

Изучение метана с помощью газовой хроматографии выполнялось в рамках госзадания (тема № FMWE-2024-0019). Экспедиционные исследования и подготовка материалов выполнялись за счет гранта Российского научного фонда № 20-17-00157, <https://rscf.ru/project/20-17-00157/>.

Список литературы

- 1) Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- 2) Юрганов Л.Н. Связь между переносом метана в атмосферу и разрушением ледяного покрова Карского моря: спутниковые данные за 2003–2019 гг. // Лёд и Снег. 2020. Т. 60, № 3. С. 423–430.
- 3) Егоров А.В., Кудрявцева Е.А., Рожков А.Н. Метан в поверхностных водах Карского моря и морях Европейской Арктики // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 11-15 апреля, Москва. Т. IV. М.: ИО РАН. 2022. С. 56–60.
- 4) Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н., Глуховец Д.И., Шевченко В.П., Белан Б.Д. 89-й рейс (1 этап) научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш»: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией ТУ-134 «Оптик» в Карском море // Океанология. 2023. Т. 63, № 3. С. 492–495.
- 5) Большаков А.М., Егоров А.В. Об использовании методики фазоворавновесной дегазации при газометрических исследованиях // Океанология. 1987. Т. 27, № 5. С. 861–862.
- 6) Самылина О.С., Русанов И.И., Тарновецкий И.Ю., Якушев Е.В., Гринько А.А., Захарова Е.Е., Меркель А.Ю., Канапацкий Т.А., Семилетов И.П., Пименов Н.В. О возможности аэробной продукции метана пелагическими микробными сообществами моря Лаптевых // Микробиология. 2021. Т. 90(2). С. 131–144.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ
УССУРИЙСКОГО ЗАЛИВА (ЯПОНСКОЕ МОРЕ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СЪЕМКИ
2018 ГОДА

Абдрахманова О.Т., Журавель Е.В., Донец М.М.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: донные осадки, биотестирование, Уссурийский залив, токсичность, стойкие органические соединения.

Донные осадки являются важным компонентом водных экосистем, в них обитают многочисленые представители бентосных организмов, составляющие основу многих пищевых цепей. Также в донных отложениях аккумулируются органические и неорганические вещества, в том числе токсичные для гидробионтов. Помимо процессов накопления, в осадках протекают процессы трансформации химических соединений, продукты которых могут обладать более токсичными свойствами, чем первоначальные химические вещества. Кроме того, донные отложения могут становиться источником повторного загрязнения водной толщи. В связи с этим возрастает необходимость контроля содержания загрязняющих веществ в донных осадках, а также их влияния на живые организмы. Поэтому в экологических исследованиях применяют химико-аналитические и биологические методы, в частности биотестирование. Химический анализ дает возможность определить вид поллютанта и его количество, а биотестирование позволяет проследить реакцию гидробионтов на загрязнение.

Пробы донных осадков были отобраны в 2018 году с 21 станции из прибрежной и центральной частей Уссурийского залива. В донных осадках определяли содержание пестицидов (ХОП) и полихлорированных бифенилов (ПХБ) методом газовой хроматографии [1] и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) методом обращено-фазовой высокоэффективной жидкостной хроматографии [2]. Оценку потенциальной токсичности донных отложений проводили на основе расчета индекса SQG-Q по формуле: $SQG-Q = \Sigma PEL-Q/n$, где $\Sigma PEL-Q$ – отношение средней концентрации токсиканта в осадках к величине PEL (Probable Effect Levels – уровень вероятного токсического эффекта); n – количество токсических соединений [3].

Подготовку водных вытяжек для биотестирования выполняли по стандартной методике [4]. Токсичность проб оценивали по изменению численности культуры микроводоросли *Phaeodactylum tricorutum*, гибели науплий жаброногого ракообразного *Artemia salina* [4] и нарушению раннего развития личинок морского ежа *Scaphechinus mirabilis* [5].

Результаты химического анализа выявили высокий уровень загрязнения донных отложений Уссурийского залива стойкими органическими загрязняющими веществами. Наибольшее суммарное содержание ХОП (от 545 до 8127 нг/г) и ПХБ (от 240 до 19056 нг/г) зафиксировано в донных осадках центральной части залива. Высокий уровень загрязнения донных отложений ПАУ (от 1501 до 2551 нг/г) отмечался на станциях, расположенных преимущественно вдоль береговой части г. Владивостока и в центральном разрезе. На всех остальных станциях отмечалось умеренное загрязнение ПАУ.

По результатам расчёта индекса потенциальной токсичности (SQG-Q) [3] донные осадки с двух станций, расположенных в центре залива, имели высокий уровень токсичности (SQG-Q=12,8 и 1,85); с пяти станций – умеренный уровень: м. Басаргина и б. Сухопутная на западном побережье и м. Красный, м. Палец и м. Седловидный на восточном берегу. Все остальные пробы отнесены к нетоксичным.

Результаты биотестирования показали различные реакции тест-организмов. У науплий *A. salina* в большинстве проб негативной реакции не выявлено, за исключением проб с м. Теляковского и из центральной части залива, в которых погибло 70-100% ракообразных. Наибольшее негативное воздействие на микроводоросли *P. tricorntutum* в остром эксперименте (72 ч) оказали водные вытяжки из кутовой и восточной частей Уссурийского залива, численность клеток в этих вытяжках изменялась от 6 до 42% от контроля. В хроническом тесте (7 сут) продолжалось ингибирование роста численности клеток в большинстве проб. Исключение составляли пробы из р-на м. Басаргина и бухт западной части залива – Сухопутной и Промежуточной, где на протяжении всего эксперимента отмечался интенсивный рост культуры, который значительно превысил контроль (более 140%). В эмбриотесте с плоским морским ежом *S. mirabilis* более 40% уродливых личинок, имеющих нарушение в развитии, на стадии гастрюлы (после 18 ч), зафиксировано на станциях, расположенных вдоль городской черты Владивостока. Гибель всех личинок наблюдалась в вытяжках донных отложений из центральной части залива. После 48 ч инкубации в большинстве проб отмечалось высокое эмбриотоксическое воздействие, процент аномально развитых и погибших плутеусов составил более 50%. Такие показатели свидетельствуют о высокой токсичности донных осадков на данных участках для личинок морского ежа. В целом в экспериментах наибольшую чувствительность показали эмбрионы и личинки плоского морского ежа, значительное ингибирование роста численности наблюдалось у микроводорослей, наименее чувствительными оказались науплии *A. salina*. Разные реакции на загрязнение донных осадков связаны с различной чувствительностью и экологическими особенностями тест-организмов. Негативный эффект на все три тест-объекта оказывали донные осадки из окрестностей мысов Обрывистый, Теляковского, Седловидный и из центральной части залива.

Таким образом, по результатам химического анализа содержания органических загрязняющих веществ для большинства проб донных осадков из Уссурийского залива выявлена невысокая потенциальная токсичность, с низким уровнем вероятного риска неблагоприятных последствий для биоты. Однако полученные при биотестировании данные отражают реальное негативное воздействие загрязнённых донных отложений на гидробионтов. Проведенное исследование подтверждает необходимость применения интегральной оценки состояния водных экосистем с использованием как химических, так и биологических методов.

Финансирование отсутствует.

Список литературы

- 1) Tsygankov V.Y., Boyarova M.D. Sample Preparation Method for the Determination of Organochlorine Pesticides in Aquatic Organisms by Gas Chromatography / V.Yu. Tsygankov, Boyarova // Achievements in the Life Sciences 9. 2015. P. 65-68.
- 2) Chernyaev P., Zyk, E.N., Butorin, D.A. Method of Determining General and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Components of Ecosystem Application. Patent of Russian Federation RU 2589897 C1, 10 July 2016.
- 3) MacDonald D.D., Carr R.S., Eckenrod D., Greening H., Grabe S., Ingersoll C., Janicki S., Janicki T., Lindskoog R.A., Sloane G., Smorong D.E. Development, evaluation, and application of sediment quality targets for assessing and managing contaminated sediments in Tampa Bay, Florida // Arch. Environ. Contam. Toxicology 46. 2004. P. 147-161.
- 4) Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов // М.: РЭФИА, НИА–Природа, 2002. 118 с.
- 5) Morroni L., Pinsino F., Pellegrini D., Regoli F., Matranga V. Development of a new integrative toxicity index based on an improvement of the sea urchin embryo toxicity test // Ecotoxicol. Environ. Saf. 12. 2016. P. 1-5.

СОДЕРЖАНИЕ МИКРОПЛАСТИКА В ПРЕСНОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ЮГА РОССИИ

Анциферова М.А.^{1,2}, Беспалова Л.А.¹, Клещенков А.В.²

¹Южный Федеральный Университет, Институт Наук о Земле

²Южный Научный Центр Российской Академии Наук

Ключевые слова: микропластик, пластиковый мусор, антропогенное загрязнение, реки.

В работе представлены результаты исследований содержания микропластика в некоторых пресноводных системах Юга европейской части России за период 2021-2023 гг. Были поставлены такие цели, как оценка концентраций микропластика, изучение физико-химических характеристик частиц и анализ методических аспектов отбора и анализа проб в природных поверхностных водах.

Образцы воды собирались с поверхностного слоя, глубиной около 30 см во время экспедиционных работ ЮНЦ РАН: в 2021 году на НИС «Профессор Панов» в Нижнем Дону, Северском Донце, и Цимлянском вдхр.; в 2022 году на НИС «Денеб» в Нижнем Дону, Цимлянском водохранилище, Волго-Донском канале и Нижней Волге (летний период) и в 2023 году там же (осенний период). В первые два года, пробы, объёмом 1 л, отбирались батометром в стеклянные бутылки, в 2023 г. использовался более распространённый метод траления нейстонной сетью типа Манта (размер ячеей 0,3 мм) [1], объём пропущенной воды варьировал в пределах 100-500 л.

Лабораторная обработка проводилась согласно модифицированной методике NOAA [2], далее следовала визуальная сортировка с описанием частиц и определение состава. В ходе работы соблюдался тщательный контроль качества: использовались только стеклянные и металлические предметы совершался прогон холостых проб, экспонирование чашек Петри с дистиллированной водой в течении всего анализа. Стороннее загрязнение проб во время обработки обнаружено не было. В процессе отбора фоновые пробы не отбирались, но при тралении учитывался цвет краски борта судна и рабочей одежды – идентичные объекты, а также волокна менее 0,3 мм не учитывались при дальнейшем подсчёте.

Что касается определения уровня загрязнения микропластиком, то сравнение данных всех трёх лет недопустимо, в связи с разным методом отбора проб, но отмечено снижение концентраций в 2022 году по сравнению с 2021. Необходимо проведение долгосрочного однообразного наблюдения для выводов о временном и пространственном распределении загрязнителя.

В 2021 году в Нижнем Дону средний уровень загрязнения составил 36 шт./л, в Северском Донце это значение достигло 38 шт./л, Цимлянском вдхр. – 33 шт./л. В следующем, 2022 году, в Нижнем Дону обнаружены 21 шт./л, Цимлянском вдхр. – 10 шт./л, Нижней Волге – 16 шт./л. Концентрации частиц в Волго-Донском судоходном канале (ВДСК) определялись в каждом отдельном водохранилище и составили в Карповском вдхр. – 11 шт./л, Береславском вдхр. – 14 шт./л, Варваровском вдхр – 19 шт./л.

Морфологические и морфометрические особенности микропластика по результатам обеих съёмок похожи: во всех исследуемых объектах преобладают прозрачные волокна, размерный диапазон которых варьирует в пределах 0,1-1 мм, наиболее часто встречаются волокна длиной 0,3-0,5 мм. Единично замечены цветные (чёрные, розовые, синие) частицы, гранулы или плёнки, редко представлены образцы в размерном диапазоне 1-5 мм.

Состав микропластика определялся спектроскопией комбинационного рассеяния. Частицы, полученные на этом этапе исследования, выступали опытными образцами для настройки прибора и поэтому идентифицировать удалось меньшую часть. Кроме того, проблемы возникали в связи с особенностями самого микропластика: он имеет сильно деградированную структуру, неровную

форму и прозрачный цвет, что приводит к флуоресцентным интерференциям, низкому соотношению сигнал/шум, а также вероятности прожечь образец [3]. Поэтому, из всех найденных микрочастиц идентифицировать удалось около 30% и все определены как синтетические полимеры, широко используемые в быту, а именно: полиэтилен (упаковка и бутылки), полиамид (текстиль и рыболовные снасти), полистирол (одноразовая посуда), а также вещества, используемые в качестве пластификаторов и термостабилизаторов пластмасс.

По результатам работ 2023 года, проведённых тралением, в водах Нижнего Дона концентрации микропластика составили 94,32 шт./м³ (0,0047 г/м³), Цимлянского водохранилища – 12,3 шт./м³ (0,0020 г/м³), в Нижней Волге 81,06 шт./м³ или же 0,0022 г/м³.

Морфологическое и морфометрическое разнообразие оказалось весьма ярким: кроме волокон (63%), присутствовали плёнки (16%), гранулы (14%), фрагменты (7%), цвет микрочастиц преобладал прозрачный (42%), но также широко распространён чёрный (20%), белый (11%), синий (11%), розовый (7%), остальная масса имела серый, бирюзовый, зелёный, коричневый и жёлтый окрас.

Значительное разнообразие микропластика позволило провести анализ состава как Рамановской спектроскопией комбинационного рассеяния, так и ИК-Фурье спектроскопией. Сначала один метод дублировал другой на отдельно выбранных образцах из каждой характерной группы (группы формировались по цвету и геометрии при визуальной сортировке) для каждой станции. После они дополняли друг друга, т.к. разный вид анализа хорошо подходит для определённых частиц. Обнаружен схожий с предыдущим перечень материалов, среди которых также присутствуют также полиэтилен высокого и низкого давления, полиэтилентерефталат, полиамид, полипропилен, полистирол, полиакрилат, полиуретан, ПВА, ПВХ и пр. Большинство волокон, по составу являются полиэтиленом, полиамидом (в особенности нейлоном) и полиакрилатом.

Таким образом, результаты показывают высокие концентрации микропластика в водах Нижнего Дона, Цимлянского водохранилища и Нижней Волги. Можно предполагать, что этот мусор возник как результат фрагментации объектов бытового, одноразового применения.

Работа выполнена в рамках госзадания ЮНЦ РАН № госрегистрации 122011900153-9.

Список литературы

- 1) Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде // М.: Научный мир, 2021. 520 с.
- 2) Зобков М.Б., Есюкова Е.Е. Микропластик в морской среде: обзор методов отбора, подготовки и анализа проб воды, донных отложений и береговых наносов // Океанология Т. 58, № 1. 2018. С. 149–157.
- 3) Юдин А.В., Пащенко А.С., Данилина Э.М., Юрасов Ю.И. Применение Рамановской спектроскопии для исследования структуры и химического состава микропластика в пробах поверхностных и сточных вод // ЭКОЛОГИЯ 2023 – МОРЕ И ЧЕЛОВЕК: XII Всероссийская научная конференция и молодёжная школа-семинар. Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета. 2023. С. 230–233.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО КОНТРАСТНОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗВРАТНОЙ МИГРАЦИИ НЕРКИ В УСТЬЕ РЕКИ ФРЕЙЗЕР

Борисов М.А.^{1,2}, Криницкий М.А.^{1,2,3}

¹Московский физико-технический институт, Долгопрудный

²Институт океанологии имени П. П. Ширшова Российской академии наук, Москва

³Казанский федеральный университет, Казань

Ключевые слова: нерка, нейронные сети, машинное обучение, глубокое обучение, GLORYS12.

Река Фрейзер является крупнейшей рекой в провинции Британская Колумбия в Канаде. В регионе устья этой реки ведется промысловый вылов нерки предприятиями Канады и США. География устьевой части реки и прилегающих регионов Тихого океана характеризуется сложной системой проливов между островом Ванкувер и материковой Канадой. Промысловые сезоны и соотношения по вылову нерки между США и Канадой обуславливаются характеристиками возвратной миграции нерки в этой системе проливов. Наше исследование основано на предположении, что поведение нерки сильно зависит от химического состава морской воды, температуры поверхности моря и динамики в верхних слоях океана в пространстве и во времени. Таким образом, мы предполагаем, что результирующие маршруты и сроки возвращения лосося могут зависеть от таких переменных, как локальные течения и круговороты различного масштаба, региональная соленость и температура поверхности моря, в том числе переменные, связанные с взаимодействием воздух-море.

Цель данного исследования заключается в создании статистической модели, способной прогнозировать характеристики возвратной миграции нерки на основе факторов окружающей среды, которые обычно представляют собой временные ряды.

В данном исследовании рассматриваются следующие ключевые параметры возвратной миграции нерки (*Oncorhynchus nerka*) в качестве целевых переменных: медианная дата возвратной миграции для подвидов Chilko и Early Stuart и доля северного отклонения. Медианная дата возвратной миграции характеризует момент, когда 50% возвращающихся нерки подвида Chilko и Early Stuart из северо-восточной части Тихого океана прибывают в устье пролива Хуан-де-Фука между Канадой и США. Доля нерки с северным маршрутом миграции (NDR – North Diversion Rate), возвращающейся в реку Фрейзер через пролив Джонстон, в сравнении с возвращающимися через пролив Хуан-де-Фука, отражает процентный коэффициент ухода рыбы на северный маршрут в течение года. Медианная дата была переведена в порядковый день, поделена на количество дней в году, что позволило нормировать переменную. Затем для учета периодичности явления возвратной миграции был вычислен косинус медианной даты, поделенной на количество дней, после чего была проведена нормализация данных с медианой в 0 и дисперсией равной единице. В качестве признакового описания в данном исследовании применяются пространственные временные ряды реанализов GLORYS12[1], CMCC CHOR[2]. Важной особенностью этих данных являются различные характерные шаги сетки по географическим координатам и по времени, а так же различные временные периоды доступности этих данных.

В качестве опорного метода мы применили модели классического машинного обучения на данных четырех контрольных точек в Тихом океане. Пара контрольных точек была выбрана вблизи острова Ванкувер из предположения, что по этим точкам возможно оценить долю нерки с северным маршрутом миграции. Оставшаяся пара точек были выбраны в северо-западной части Тихого океана, которые содержат информацию о процессах проходящих в океане и позволит точнее оценить даты возвратной миграции. Таким образом, состояние океана описывается вектором

извлеченных в четырех точках параметрами на протяжении первых семи месяцев года: зональная и меридиональная скорость поверхности океана, зональная и меридиональная скорость ветра над поверхностью океана, соленость и температура поверхностного слоя океана. Август и последующие месяцы не рассматривались в связи с тем, что возвратная миграция происходит в конце июля и начале августа. В рамках задачи прогнозирования характеристик возвратной миграции нерки нами применяются различные модели машинного обучения. В частности в первом приближении применены линейные модели: линейная регрессия, случайный лес [3], гребневая регрессия для обучающей выборки. Значения RMSE (Root Mean Squared Error) обученных классических моделей для каждой из целевых переменных лежат в пределах (0.3;1.0) и корреляция в пределах (0.5;0.9). Данные результаты показывают возможность прогнозирования характеристик возвратной миграции нерки. Так же наиболее перспективным методом является подход с использованием искусственных нейронных сетей. В частности, мы предлагаем использовать MoCo [4] модели для извлечения наиболее информативных признаков, на которых в дальнейшем обучать классические модели машинного обучения. Перспективным видится end-to-end подход при использовании ConvLSTM [5] сетей для обработки пространственных временных рядов напрямую и решения задачи регрессии трех целевых переменных, поскольку нейронные сети обладают большей обобщающей способностью. Дальнейшие исследования в этой области могут помочь расширить наше понимание миграционных процессов и способствовать сохранению популяции нерки.

Исследование проведено в рамках стратегического проекта «Исследовательское лидерство (от бакалавра до нобелевского лауреата)» программы «Приоритет-2030» Московского физико-технического института. Численная оптимизация моделей проведена при поддержке Госзадания № FMWE2022-0002.

Список литературы

- 1) Jean-Michel L., Eric G., Bourdalle-Badie R., Garric G., Melet A., Drevillon M., Bricaud C., Hamon M., Olivier L.G., Charly R., Candela T., Charles-Emmanuel T., Gasparin F., Giovanni R., Mounir B., Yann D., Le Traon P.-Y. The Copernicus global 1/12 oceanic and sea ice GLORYS12 reanalysis // *Frontiers in Earth Science* 9. 2021. P. 698876.
- 2) Yang C., Masina S., Storto A. Historical ocean reanalyses (1900–2010) using different data assimilation strategies // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 143(702). 2017. P. 479-493.
- 3) Breiman L. Random forests // *Machine learning* 45. 2001. P. 5-32.
- 4) He K., Fan H., Wu Y., Xie S., Girshick R. Momentum contrast for unsupervised visual representation learning // *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*. 2020. P. 9729-9738.
- 5) Zha W., Liu Y., Wan Y., Luo R., Li D., Yang S., Xu Y. Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model // *Energy* 260. 2022. P. 124889.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОТНОСТИ КУЛЬТУРЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *TETRASELMIS* SP. НА ЧИСЛЕННОСТЬ КОЛОВРАТКИ СОЛОНОВАТОВОДНОЙ *BRACHIONUS PPLICATILIS* (Müller, 1786).

Боцун Л.А., Московко В.Е., Масленников С.И.

Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: культура микроводорослей, коловратки, живые корма, плотность, численность культуры.

Коловратки, в частности массово культивируемые *B. plicatilis*, являются популярным и важным источником пищи, способствующим успешному производству личинок и молоди ракообразных и рыб. Обогащенный микроводорослями живой корм существенно повышает выживаемость личинок, науплий артемии и коловраток [1]. В естественной среде коловратки питаются микропланктоном, находящимся во взвешенном состоянии. Некоторые из этих микроводорослей, например виды рода *Tetraselmis*, обладают пробиотическим (противомикробным и фунгицидным) свойством. Пищевая ценность коловраток в аквакультуре точно отражает то, что они потребляют. Gatesoupe (1982) [2] обнаружил, что коловратки могут передавать полномасштабные, микро-, макро- и даже антитела целевому организму [3].

Целью данной работы было определить плотность культуры микроводорослей рода *Tetraselmis*, для достижения наивысшей численности культуры коловраток. Так же оценить выедание микроводорослей в емкостях с коловратками.

В аквариальной ННЦМБ ДВО РАН в четыре десятилитровые емкости с начальным объемом фильтрованной морской воды 5,5 литров были рассажены коловратки из маточной культуры численностью 25-30 экз./мл. Перед экспериментом коловраток выдерживали сутки без корма. Заранее в трех отдельных емкостях нарастили культуру микроводорослей рода *Tetraselmis* sp объемом 30 литров, который поддерживали в течении всего эксперимента путем добавления питательной среды. Эксперимент проходил в три этапа каждый из которых длился две недели. На первом этапе добавляли 180 мл микроводорослей в день, на втором 220 мл, на третьем 260 мл. Кормление с замерами температуры и освещенность производили ежедневно. Подсчет коловраток производили в камере Богорова, а, так же плотности кормовой культуры микроводорослей и плотности *Tetraselmis* sp в емкостях с коловратками осуществляли через день. Измерение плотности микроводорослей в емкостях делали на следующее утро до кормления, предварительно отфильтровав пробы через газ 29 мкм. Определение оптической плотности на длине волны 750 нм (OD750) проводили с помощью спектрофотометра ПЭ-5400ВИ в стеклянных кюветах с оптическим путем 10 мм [4]. Температура была в пределах 19,5 – 22°C, освещенность 2050 Lux.

На первом этапе, при добавлении 180 мл/день, плотность кормовой культуры микроводорослей варьировала от 0,106 до 0,329; в среднем составляла 0,198 у. е. Плотность микроводорослей во всех четырех емкостях с личинками держалась на уровне 0,000-0,002 у. е. На девятый день измерение показало 0,005 у. е. Численность коловраток, в большинстве емкостей одновременно, достигла 51 экз./мл на 12-й день наблюдений.

На втором этапе, при добавлении 220 мл/день, плотность кормовой культуры микроводорослей изменялась от 0,056 до 0,198 у. е., в среднем была 0,117 у. е., что ниже, чем на первом этапе на 30%. Утренние замеры плотности, в первые четыре дня, показали отсутствие микроводорослей в емкостях с коловратками. В последующие дни до конца этапа плотность была в пределах 0,002–0,003 у.е. Численность коловраток после посадки имела плавную тенденцию к снижению до 10-го дня, и составляла в среднем для всех емкостей 27,6 экз./мл. Далее отмечен скачок в численности коловраток до 52,1 экз./л.

На третьем этапе, при добавлении 260 мл/день плотность кормовой культуры микроводорослей изменялась от 0,076 до 0,220 у. е., в среднем составляла 0,140 у. е. Плотность микроводорослей в емкостях с коловратками перед кормлением во всех емкостях в среднем была 0,002 у. е. Численность коловраток на протяжении всего этапа росла медленно. На 14-й день этапа достигла в среднем 38 экз./мл.

По результатам эксперимента можно рекомендовать стартовую плотность культуры микроводорослей рода *Tetraselmis* sp 0,190 у.е.

Исследование выполнено в рамках договора НИР с грантом Российского научного фонда (РНФ) № 21-74-30004 (рук. Елисейкина М.Г.).

Список литературы

- 1) Dhert P., King N., O'brien E. Stand-alone live food diets, an alternative to culture and enrichment diets for rotifers // *Aquaculture*. V. 43. 2014. P. 59–64.
- 2) Gatesoupe F.J. Nutritional and antibacterial treatments of live food organisms: the influence on survival, growth rate and weaning success of turbot (*Scophthalmus maximus*) // *Annales de zootechnie*. V. 31, №4. 1982. P. 353–368.
- 3) Radhakrishnan D.K., Akbarali I., Schmidt B., John E.M., Sureshkumar S., Sankar T.V. Improvement of nutritional quality of live feed for aquaculture: An overview // *Aquaculture Research*. V. 51, № 1. 2020. P. 1–17.
- 4) Боцун Л.А., Маркина Ж.В., Масленников С.И. Методика быстрого определения численности культур микроводорослей в аквакультуре // *Актуальные проблемы освоения биологических ресурсов Мирового океана*. 2022. С. 48–51.

ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МОЛЛЮСКАХ ОТДЕЛЯЮЩИХСЯ ВОДОЕМОВ БЕЛОГО МОРЯ: ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Будько Д.Ф.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук

Ключевые слова: металлы, биоаккумуляция, биогеохимические индикаторы, Mg/Ca, Sr/Ca.

По отношениям некоторых элементов к Ca в раковинах моллюсков можно извлекать информацию о свойствах окружающей среды, таких как температура, соленость и продуктивность. Так отношения Mg/Ca и Sr/Ca применяют для оценки температуры воды за счет температурной зависимости процесса замещения кальция Mg и Sr в кристаллической структуре карбонатов [1]. Также обнаруживаются связи между аккумуляцией Li в раковинах моллюсков и температурой воды, а Ba, Mo, Cd и U с продуктивностью экосистем [1-3]. Однако, из-за сильного биологического контроля аккумуляции биофильных элементов (например, Mg, Sr) в карбонатах, отклик этих элементов на изменчивость параметров внешней среды не всегда бывает надежным. Поэтому актуален поиск новых закономерностей между содержанием элементов в биогенных карбонатах и параметрами окружающей среды. Настоящее исследование посвящено изучению связи между различными параметрами среды (температурой, соленостью, продуктивностью) и химическим составом моллюсков, обитающих в экосистемах отделяющихся водоемов побережья Белого моря, которые в зависимости от степени изоляции от моря характеризуются значимой изменчивостью термохалинных характеристик водной толщи.

Пробы двустворчатых (*Mytilus edulis* и *Macoma balthica*) и брюхоногих моллюсков (*Peringia ulvae*) были отобраны из четырех водоемов, находящихся на разных стадиях отделения от Белого моря в сентябре 2020 года. При отборе проб моллюсков измерялась температура и соленость воды, а также отбирались пробы поверхностного слоя донного осадка для определения в них металлов и органического углерода (C_{org}). Для подготовки к химическому анализу пробы промывались деионизованной водой, высушивались методом лиофильной сушки, и растирали целиком в агатовой ступке. Разложение проб происходило в смеси из 1.5 мл дважды перегнанной концентрированной HNO_3 и 0.5 мл 30% H_2O_2 в тefлоновых сосудах при температуре не более 70 °C. Определение содержания 49 элементов производилось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС, прибор «Agilent 7500», США).

Наиболее показательные закономерности между содержанием элементов в моллюсках и свойствами окружающей среды были обнаружены для небольших (4-6 мм длина раковины) моллюсков гидробий *Peringia ulvae*. Среди всех исследуемых элементов только четыре (Li, Mg, Ti, и Ag) показали высокую корреляционную связь с температурой воды в раковинах данных организмов (r_s 0.87-0.92, при $p < 0.01$). Также высокая связь для этих металлов в гидробиях наблюдалась для солености воды, но с обратной пропорциональностью. Предлагается, что связь данных элементов с соленостью может быть косвенной и связанной с асимметричным распределением температуры и солености воды в исследуемых водоемах (более изолированные водоемы характеризовались более теплой и опресненной водой). Относительно температуры, при нормировании содержания Mg на Ca и построении регрессии было установлено, что до 76% изменчивости отношения Mg/Ca в гидробиях может объясняться изменением температуры воды. Еще более сильную зависимость от температуры воды показало отношение Sr/Li, которое было предложено в исследовании [2], как новый более чувствительный индикатор температуры воды в раковинах моллюсков. Регрессионным анализом обнаружено, что до 83% изменчивости Sr/Li в гидробиях объясняется изменением

температуры воды. При нормировании Ti и Ag на Ca в раковинах гидробий, регрессионная модель показала более слабую аппроксимацию относительно температуры воды (r^2 0.55 и 0.71, соответственно). Однако вызывает интерес то, что информация о возможных связях между отношениями Ti/Ca и Ag/Ca в биогенных карбонатах и температурой воды в литературе не обнаружена. Можно предположить, что из-за инертности к биохимическим реакциям в организме животных, влияние физиологических процессов на накопление Ti и Ag в карбонатных раковинах минимально, что говорит об их потенциальной возможности выступать в качестве индикаторов температуры воды.

Корреляционная связь также была обнаружена между отношениями Cd/Ca, Pb/Ca и U/Ca в *Peringia ulvae* и содержанием этих металлов в донных отложениях (r_s 0.64, 0.36 и 0.83, соответственно). Максимальное содержание этих металлов в гидробиях было зафиксировано в оз. Кисло-Сладком, где также наблюдалась максимальная обогатенность осадков $C_{орг}$ среди исследуемых водоемов (до 9.8%). Поэтому аккумуляция Cd, Pb и U в моллюсках *Peringia* из оз. Кисло-Сладкого можно связать с повышенной продуктивностью этого водоема.

Закономерности между аккумуляцией металлов в раковинах двустворчатых моллюсков и параметрами окружающей среды не проявлялись. Возможно, что это связано с долгим периодом жизни двустворчатых моллюсков относительно гидробий, имеющих период жизни всего 1-2 года. То есть на аккумуляцию элементов в раковинах двустворок могут накладываться межсезонные вариации параметров окружающей среды. Однако некоторые интересные закономерности были обнаружены для мягких тканей двустворчатых моллюсков. Сильная связь была найдена между содержанием Mo в мягких тканях мидий (*Mytilus edulis*) и содержанием этого металла в донных осадках (r_s 0.92, при $p < 0.01$). Ранее наблюдалось увеличение отношения Mo/Ca в раковинах двустворчатых моллюсков в весенний период после завершения активной фазы цветения фитопланктона, в организмах которого Mo принимает участие в синтезе хлорофилла [3]. По нашим данным, фазовый анализ донных отложений исследуемых водоемов показал преимущественное нахождение Mo в форме, связанной с органическим веществом. Таким образом, возможно трофическое поглощение Mo моллюсками из обогащенной данным элементом органической взеси.

Для двустворчатого моллюска рода *Macoma* была обнаружена связь между содержанием Cd в мягких тканях и донных осадках (r_s 0.76, при $p < 0.01$), что также может косвенно отражать продуктивность водоема, поскольку распределение Cd в осадках близко к распределению в них $C_{орг}$ (r 0.58, при $p < 0.01$).

Работа выполнена в рамках ГЗ (тема FMWE-2024-0020) и гранта РНФ (22-77-00097).

Список литературы

- 1) Henderson G.M. New oceanic proxies for paleoclimate // Earth and Planetary Science Letters. V. 203. 2002. P. 1–13.
- 2) Füllenbach C.S., Schöne B.R., Mertz-Kraus R. Strontium/lithium ratio in aragonitic shells of *Cerastoderma edule* (Bivalvia) — A new potential temperature proxy for brackish environments // Chemical Geology. V. 417. 2015. P. 341–355.
- 3) Thébault J., Chauvaud L., L'Helguen S. Clavier J., Barats A., Jacquet S., Pécheyran C. Barium and molybdenum records in bivalve shells: Geochemical proxies for phytoplankton dynamics in coastal environments? // Limnol. Oceanogr. V. 54, №3. 2009. P. 1002–1014.

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ АНТАРКТИДЫ В 2022 Г.

Голубева Е.А.¹, Ершова А.А.¹, Анисимова Е.В.²

¹Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: микропластик, снег, Антарктида, загрязнение

Антарктида – материк, который удален на тысячи километров от других материков, здесь находится Мировой полюс холода. Особенностью атмосферной циркуляции Антарктики являются широтные и меридиональные переносы. Межширотный обмен воздушных масс наиболее интенсивно происходит зимой и играет важную роль в осадконакоплении. Вместе со снегом в Антарктиде выпадают твердые частицы, в том числе и микропластик [1], источники которого предстоит изучить.

Отбор проб снега проводился в Восточной Антарктиде на трех круглогодичных станциях и на двух сезонных полевых базах Российской Федерации в рамках экспедиционных работ Российской Антарктической экспедиции 67 РАЭ. Исследования проводились с 19.12.2021 по 05.05.2022 гг. Объем проб определялся используемой тарой: пластиковые бутылки объемом 5 литров и стерильные герметично закрывающиеся полиэтиленовые пакеты такого же объема. Снег отбирался металлической поварёшкой. Всего было отобрано 12 проб снега разного возраста: от свежеснежавшего до старого, плотного. Пробы доставлялись в лабораторию ПластикЛаб (РГГМУ) для последующей лабораторной обработки. Контроль загрязнения проводился на всех этапах пробоотбора и лабораторного анализа. Отбор проб проводился в специальном х/б халате, надетом на верхнюю одежду, с учетом направления ветра, а также учитывались все материалы одежды для последующей коррекции результатов. Лабораторный контроль состоял в использовании процедурных бланков и соблюдении всех стандартных протоколов контроля контаминации (контроль загрязнения реактивов и посуды, «чистая лаборатория»).

Для обработки стаявших проб снега был выбран лабораторный протокол с термохимической обработкой для удаления органического вещества, которое присутствовало в значительном количестве почти во всех пробах. Протокол ПластикЛаб включает следующие этапы: мокрое просеивание, растворение органического вещества с помощью реактива Фентона ($H_2O_2 + Fe^{3+}$) на водяной бане при $T = 50^\circ C$ с последующей дополнительной выдержкой (2-3 часа) образца в растворе разбавленной соляной кислоты, вакуумное осаждение на мембранные фильтры (стекловолокно, диаметр пор 0,7 мкм), просушивание, морфологический анализ частиц (стереомикроскоп, увеличение 40х), полимерный анализ частиц (метод КРС). Каждый фильтр просматривался под оптическим стереомикроскопом, и потенциальные частицы микропластика подвергались проверке методом «горячей иглы», далее подтвержденные частицы выборочно (20 %) анализировались методом спектроскопии (КРС) для определения типа полимера. Преимущественным типом полимера стал полиметилметакрилат (ПММА), а также были определены пигменты для некоторых волокон, что указывает на их антропогенное происхождение.

Результаты исследования показали, что среднее содержание микропластиковых частиц в снежном покрове Антарктиды в 2022 г. составило 4.6 частиц на 1 л талого снега (ч/л). Максимальные концентрации частиц синтетических полимеров (7 – 9.5 ч/л талого снега) наблюдались на станциях Оазис Бангера, Новолазаревская, Молодежная. На двух последних станциях отбор проб проводился в конце сезона (апрель-май), при этом состояние снега было схожим на всех трех станциях – старый плотный слежавшийся снег, иногда с коркой льда, что очевидно послужило причиной более высоких концентраций. Наименьшие значения концентраций (0.67 – 4.2 ч/л) наблюдались на

станции Мирный и Прогресс, где исследования проводились в условиях недавно выпавшего снега. На станции Прогресс отбор проводился несколько раз в повторных точках в течение сезона, однако концентрации микропластика на этой станции оставались на одном уровне (среднее 2.0 ч/л). Более высокие концентрации микропластика в снеге также могут быть связаны с расположением точек отбора: так, например, проба на станции Новолазаревская с максимальным количеством частиц (9.5 ч/л) была отобрана рядом с местом сжигания бытовых отходов.

Нижний предел обнаружения микропластиковых частиц составил 100 мкм. Наиболее часто встречаемая размерная категория микропластиковых частиц – > 1000 мкм, размер самой крупной частицы составил 4867 мкм. Помимо микроволокон были найдены частицы более 5 мм, но в расчетах они не учитывались. Преобладающей формой частиц стали волокна (75 %), тогда как фрагментов и пленок было обнаружено 22 % и 3 %, соответственно. Больше всего частиц было обнаружено синего (40 %) и прозрачного (20 %) цветов.

По результатам исследований новозеландских ученых [1], проведенных ранее в 2019 г. на научно-исследовательских станциях база Скотт и станция Мак-Мердо, наблюдались более высокие концентрации микропластика (в среднем 29.4 ± 4.7 ч/л талого снега). На удаленных участках средняя концентрация составляла 22.5 ± 4.0 ч/л, на исследовательских станциях 47.2 ± 8.4 ч/л талого снега. Значения концентраций на российских станциях в 2022 г. значительно ниже, что может быть связано в первую очередь с различием методов отбора проб. Первоначальный объем проб снега у новозеландских исследователей составлял всего 500 мл, то есть в 10 раз меньше, чем в настоящем исследовании.

В целом результаты исследования показали значительную загрязненность микропластиковыми частицами снегового покрова вокруг исследованных станций в Антарктиде, а также зависимость содержания полимерных частиц в снеге от времени года и возраста (плотности) снежного покрова. Морфологический анализ показал значительную долю частиц фрагментов и пленок в общем содержании частиц (25 %), что значительно отличает пробы снега от проб морской воды в этом регионе, где преимущественно определяются волокна разного цвета и состава.

Проведенное исследование в очередной раз показало необходимость унификации методических подходов к отбору и анализу проб для определения частиц микропластика для решения проблем сравнения результатов различных исследований.

Поступление частиц в Антарктику возможно как с атмосферными осадками, так и из местных источников (от антарктических станций), однако для обнаружения достоверного источника микропластиковых частиц необходимо проведение дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-27-00456 «Исследование загрязнения региона Антарктики морским мусором и микропластиком».

Список литературы

- 1) Aves A.R., Revell L.E., Gaw S., Ruffell H., Schuddeboom A., Wotherspoon N.E., LaRue M., McDonald A.J. First evidence of microplastics in Antarctic snow // *The Cryosphere* 16. 2022. P. 2127–2145.

ИММУННЫЙ СТАТУС ПРОМЫСЛОВЫХ ВИДОВ МОЛЛЮСКОВ ИЗ АКВАТОРИЙ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО С РАЗЛИЧНЫМИ ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ

Гринченко А.В.^{1,2}, Сокольникова Ю.Н.¹, Тумас А.В.¹, Цой Е.А.¹, Буряк И.А.^{1,2}, Мокрина М.С.¹, Кумейко В.В.^{1,2}

¹Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: промысловые моллюски, гемолимфа, иммунитет, аквакультура, скрининг гидробионтов, мониторинг здоровья, морские биотехнологии.

Одна из ключевых проблем, сдерживающих развитие аквакультуры – это недостаточный уровень ветеринарного обслуживания данной отрасли промышленности, связанный с отсутствием эффективных и научно-обоснованных методов контроля и диагностики состояния здоровья морских организмов и среды их обитания.

Изменения параметров внутренней среды являются наиболее адекватным отражением адаптации организма к переменам, возникающих как во внешней среде, так и внутри самого организма. В этом отношении перспективным и высокочувствительным биомаркером функционального состояния гидробионтов и среды их обитания является оценка иммунного статуса по параметрам клеточных и гуморальных факторов гемолимфы. Как показывают результаты многочисленных исследований в условно идеальной среде обитания (с оптимальным запасом пищевых ресурсов, в отсутствие загрязнений и ярко выраженных инфекций), основными факторами, оказывающими влияние на параметры гемолимфы, являются температура воды, соленость и репродуктивный статус животных. Используя последующее сравнение параметров гемолимфы в условиях стресса с нормой, можно проводить динамические наблюдения за состоянием, как отдельной особи, так и популяции в целом при различных условиях.

В данной работе был выполнен скрининг состояния здоровья промысловых видов моллюсков из акваторий залива Петра Великого Японского моря с различными экологическими условиями с целью определения референсных значений вариативности показателей иммунитета моллюсков, отличающихся как образом жизни, так и местом обитания, что позволит в дальнейшем проводить исследования в контексте широкого комплекса экологических и гидрологических факторов, в том числе при тестировании и других видов моллюсков различных регионов.

В качестве объекта исследования были использованы 16 видов моллюсков: китайская мактра (*Macra chinensis*), мерценария Стимпсона (*Mercenaria stimpsoni*), сахалинская спизула (*Spisula sachalinensis*), гребешок японский (*Azumapecten farreri*), гребешок приморский (*Mizuhopecten yessoensis*), гребешок Свифта (*Swiftopecten swiftii*), устрица гигантская (*Magallana (Crassostrea) gigas*), мидия Грея (*Crenomytilus grayanus*), модиолус курильский (*Modiolus kurilensis*), арка Боукарда (*Arca boucardi*), тихоокеанская мидия (*Mytilus trossulus*), песчаная мия (*Mya arenaria*), саксидомус пурпурный (*Saxidomus purpuratus*), тихоокеанский петушок (*Ruditapes philippinarum*), анадара Броутона (*Anadara broughtonii*) и корбикула японская (*Corbicula japonica*). Сбор моллюсков осуществляли из условно-фоновых акваторий – залив Восток, бухта Песчаная, Тавричанский лиман, и из импактных акваторий – бухта Гайдамак, бухта Средняя, Спортивная гавань, бухта Патрокл и Амурский залив (мыс Красный), которые не соответствуют санитарно-эпидемиологическим требованиям по фенолам, нефтепродуктам, концентрациям кислорода, фосфора, тяжелых металлов, а также КОЕ патогенных (в частности энетерококков) и нефтеокисляющих бактерий. Взятие образцов гемолимфы производили не летальным способом из синуса заднего мускула-аддуктора, после чего их центрифугировали для отделения гемоцитов от плазмы. Оценку активности клеточно-опосредованных защитных факторов иммунитета проводили по показателям нст-теста и

in vitro реакции фагоцитоза с помощью микропланшетного ридера Spark 10M и Bio-Rad iMark. Для оценки активности гуморальных факторов иммунитета определяли литическую и агглютинирующую активность плазмы, в том числе с помощью ридера Bio-Rad iMark. Анализ данных был выполнен в программе Statistica. Тест Колмогорова-Смирнова показал, что данные не имеют нормального распределения ($p < 0,05$), поэтому для выявления различий между выборками использовали непараметрическую статистику (критерий Манна-Уитни).

Сравнительный анализ гемагглютинирующей активности плазмы выявил повышение данного показателя у большинства видов животных из импактных акваторий, за исключением корбикулы, гребешка японского, мерценарии и мактры. При этом у гребешка приморского ($p = 0,02$), устрицы ($p = 0,02$) и мидии Грея ($p = 0,0002$) показатели имели достоверные различия. Достоверное повышение гемолитической активности плазмы было выявлено лишь у корбикулы ($p = 0,00000$), а понижение – у саксидомуса ($p = 0,00002$), арки ($p = 0,0004$), мидии тихоокеанской ($p = 0,002$), мии ($p = 0,025$) и модиолуса ($p = 0,04$), выловленных из импактных акваторий. Тогда как плазма мактры, спизулы, мерценарии, устрицы, гребешка приморского и Свифта вообще не проявила лизирующей активности против эритроцитов человека. Фагоцитарная активность достоверно различалась у наибольшего числа видов по сравнению со всеми другими показателями. Так, этот показатель снижался только у мактры ($p = 0,01$), но достоверно повышался у мерценарии ($p = 0,0007$), устрицы ($p = 0,00001$), мидии Грея ($p = 0,000000$), мии ($p = 0,0001$), петушка ($p = 0,005$), анадары ($p = 0,000000$), модиолуса ($p = 0,000000$), гребешка приморского ($p = 0,00004$) и Свифта ($p = 0,01$), выловленных из импактных акваторий. Анализ концентрации активных форм кислорода, измеренный нст-тестом, выявил схожую тенденцию: показатель был достоверно снижен лишь у мактры ($p = 0,000005$) и спизулы ($p = 0,02$), и повышен у модиолуса ($p = 0,000007$), гребешка японского ($p = 0,000008$), мидии Грея ($p = 0,000001$), мии ($p = 0,001$), петушка ($p = 0,006$), анадары ($p = 0,000000$) и корбикулы ($p = 0,000000$), также выловленных из импактных акваторий.

Таким образом, результаты данной работы показывают, что показатели иммунитета двустворчатых моллюсков являются достоверными биомаркерами состояния среды их обитания. Разработанный подход, основанный на иммунных параметрах, является эффективной альтернативой существующим трудозатратным гистологическим методам диагностики здоровья популяций морских гидробионтов, с помощью которого можно будет оценить иммунный и физиологический (адаптационный, функциональный, в широком смысле отражающий показатели здоровья) статусы индивида в норме и при отклонениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10051, <https://rscf.ru/project/23-76-10051/> на базе ЦКП «Приморский океанариум» ННЦМБ ДВО РАН (Владивосток).

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ТЕХНОГЕННЫХ НАГРУЗОК В БАЛАКЛАВСКОЙ БУХТЕ ЗА ПЕРИОД 2005–2019 ГГ.

Гуров К.И., Котельянец Е.А., Гурова Ю.С.

ФГБУН ФИЦ "Морской гидрофизический институт РАН", г. Севастополь

Ключевые слова: Балаклавская бухта, донные отложения, тяжелые металлы, геохимические индексы, коэффициент обогащения, индекс геоаккумуляции

Мониторинг содержания в донных осадках загрязняющих веществ в том числе тяжелых металлов очень актуален для прибрежных районов Черного моря, и особенно районов Крымского полуострова, известных своей курортной привлекательностью. Особый интерес представляют мониторинговые наблюдения за водными объектами, испытывающими антропогенную нагрузку, поскольку при этом может происходить как самоочищение вод, так и их вторичное загрязнение. Одним из характерных примеров полузамкнутой акватории, подверженной длительной интенсивной антропогенной нагрузке, является Балаклавская бухта. Исследованию геохимических характеристик, содержания и пространственного распределения различных микроэлементов в донных отложениях Балаклавской бухты в разные годы, а также выявлению корреляционных связей между накоплением этих микроэлементов и геохимическими характеристиками донных отложений посвящен ряд работ [1, 2]. Однако, в этих работах представлены исследования, ограниченные временным масштабом одной съемки, а комплексному изучению пространственно-временной изменчивости уровня загрязнения донных отложений Балаклавской бухты не уделяется внимания.

Целью настоящей работы является выявление особенностей накопления в донных отложениях Балаклавской бухты различных микроэлементов, оценка пространственного распределения областей техногенных нагрузок в период с 2005 по 2019 гг. с использованием различных геохимических индексов.

В настоящей работе использовались данные, полученные в рамках экспедиционных работ Морского гидрофизического института РАН в Балаклавской бухте в 2005, 2008, 2015, 2018 и 2019 гг. Для определения валового содержания химических элементов (Fe, Mn, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Sr, Pb) применялся метод рентгенфлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре «Спектроскан Макс-G» фирмы «Спектрон» (Россия).

Поскольку в настоящее время нормативы, регламентирующие уровни допустимого содержания микроэлементов в донных отложениях, отсутствуют, оценивать их степень загрязнения относительно предельно допустимых концентраций, по аналогии с почвами или природными водами не представляется возможным. Поэтому для оценки интенсивности техногенной нагрузки на донные отложения Балаклавской бухты было принято решение использовать различные коэффициенты и индексы, среди которых наиболее популярными являются коэффициент обогащения (КО) и индекс геоаккумуляции (I_{geo}). Для косвенной оценки показателей окислительно-восстановительной обстановки в поверхностном слое донных отложений Балаклавской бухты использовались геохимические индексы для редокс-чувствительных металлов (Mn/Fe, V/Cr [3], V/(V+Ni) [4], Ni/Co [5]).

Анализ полученных результатов показал, что для меди и цинка уровень загрязнения изменился с незначительного и умеренного до умеренно-тяжелого, а основное загрязнение локализовано в донных отложениях северного бассейна. Для свинца уровень загрязнения согласно оценкам параметра КО увеличился от тяжелого до очень тяжелого, наиболее загрязненные участки отмечены для северного бассейна в его центральной и северо-восточной кутовой частях. Донные отложения в южном бассейне практически не загрязнены выбранными микроэлементами.

Результаты анализа пространственно-временной изменчивости представленных геохимических индексов показали, что в поверхностном слое донных отложений бухты за исключением отдельных участков северного бассейна преобладают субкислородные, а для южного бассейна кислородные условия. Полученные оценки для таких соотношений как V/Cr и Ni/Co указывают на то, что пелитовые илы северного бассейна формируются в условиях близких к анаэробным.

Отмечено, что повышенный уровень загрязнения донных отложений северного бассейна результат совместного влияния природных и антропогенных факторов. Однако, локализации загрязнения на участках, расположенных вблизи источников поступления коммунальных и ливневых стоков и яхтенных стоянок, позволяет заключить, что антропогенный вклад превышает природный, а увеличение значений исследуемых индексов и параметров говорит о том, что этот вклад только возрастает.

Работа выполнена в рамках государственного задания по темам № FNNN-2024-0016 «Прибрежные исследования», FNNN-2024-0001 «Океанологические процессы» и FNNN-2022-0002 «Карбоновый полигон».

Список литературы

- 1) Гуров, К.И. Овсяный, Е.И., Котельянец, Е.А, Коновалов, С.К. Факторы формирования и отличительные особенности физико-химических характеристик донных отложений Балаклавской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал 4. 2015. С. 51–58.
- 2) Kotelyanets E.A., Gurov K.I., Tikhonova E.A., Kondratev S.I. Pollutants in Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) // Physical Oceanography 26(5). 2019. P. 414-424.
- 3) Bond D., Wignall P.B., Racki G. Extent and duration of marine anoxia during the Frasnian-Famennian (Late Devonian) mass extinction in Poland, Germany, Austria and France // Geological Magazine 41(2). 2004. P. 173–193.
- 4) Hatch J.R., Leventhal J.S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. // Chemical Geology 99(1-3). 1992. P. 65–82.
- 5) Jones B., Manning D.A.C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chemistry Geology 111. 1994. P. 111–129.

КОМПЛЕКС МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОГНОЗА МАРШРУТА ЛЕДОВОЙ ТРАССЫ С ГОДОВОЙ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТЬЮ

Деревянко Е.Г., Густоев Д.В.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: ледовые фазы, комплекс методов, долгосрочное и сверхдолгосрочное прогнозирование, ледовая трасса, навигация.

Потребность в ледовых прогнозах, таких как общая ледовитость, ледовые фазы, толщина и состояние ледового покрова, ощущается постоянно. Такие прогнозы необходимы для обеспечения навигации в замерзающих акваториях и портах, нефтегазовой инфраструктуры, обеспечением функционирования ледовых транспортных трасс и многих других отраслей народного хозяйства. Заблаговременность таких прогнозов обычно не превышает одного-двух месяцев, чего явно недостаточно, для своевременного планирования необходимых средств и техники, в рамках обеспечения нормального функционирования, например, грузового порта в период зимней навигации. Таким образом, разработка комплекса методов и подходов для обеспечения прогнозов ледовой обстановки с заблаговременностью от одного года, представляется актуальной задачей.

Целью работы является создание комплексного подхода к прогнозированию ледовых характеристик и ледовых фаз, способного обеспечить долгосрочное и сверхдолгосрочное прогнозирование этих параметров.

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

- разработать алгоритм долгосрочного и сверхдолгосрочного прогнозирования ледовых характеристик и ледовых фаз;
- определить характер, тип и наличие исходной информации;
- оценить особенности внутренней структуры изменчивости временных серий;
- очертить круг методов, необходимых для аппроксимации и экстраполяции временных рядов;
- выполнить независимое методическое прогнозирование и оценить оправдываемость прогнозов ледовых характеристик и ледовых фаз;
- очертить круг прикладных методов, для дальнейшего использования долгосрочных и сверхдолгосрочных прогнозов ледовых характеристик и ледовых фаз.

В качестве исходных данных в работе использованы временные ряды ледовых характеристик и ледовых фаз годовой дискретности, за период с 1888 по 2005гг.

Алгоритм комплекса методов и подходов для прогнозирования ледовых характеристик, ледовых фаз и грузоподъёмности ледового покрова сводится к следующему:

- предпрогнозный анализ (формирование полного уравнения прогнозирования исходных рядов с включением всех компонент) [1, 2, 3];
- методическое прогнозирование исходных рядов (выполнение не менее 20 независимых методических прогнозов по сформированному прогностическому уравнению) [1, 2, 3];
- анализ качества прогностического уравнения (оценка критериев точности и адекватности прогностического уравнения и ошибок методического прогнозирования);
- расчет грузоподъёмности ледового покрова (расчёт предельной нагрузки на ледовый покров по реперным точкам ледовой трассы) [4, 5];
- определение сроков работы и режима трафика ледовой трассы.

Таким образом, исходные данные (температура воздуха, общая ледовитость, ледовые фазы, количество градусодней мороза), необходимые для расчёта грузоподъемности, готовятся к прогнозу и прогнозируются с заблаговременностью один год.

Аппроксимация производится при помощи комплекса статистических моделей (11 моделей) [1, 2, 3], из которых, на основании оценок оправдываемости методических независимых прогнозов, выбирается лучшая.

Далее, на основании составленных прогнозов, проводится определение прочностных характеристик ледового покрова, возможность прокладки ледовой трассы, её маршрут и характеристики трафика.

Подготовка исходной информации, прогнозирование параметров, необходимых для расчёта прочностных характеристик льда и определение маршрута будущей трассы, начинается по окончании сезона зимней навигации (полном стаивании ледового покрова). Прогнозирование выполняется на весь зимний период следующего гидрологического года.

При наличии полного комплекта исходной информации, процесс прогнозирования и расчётов занимает от 1 часа до 3 суток, в зависимости от квалификации пользователя и характера исходных данных.

Финансирование отсутствует.

Список литературы

- 1) Вайновский П.А., Титов Ю.Э. Методические рекомендации по статистико-вероятностному прогнозированию океанологических характеристик. Мурманск: ПИПРО, 1989. 93 с.
- 2) Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П. Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса "Призма". Мурманск: ПИПРО, 1997. 40 с.
- 3) П.А. Вайновский, Д.В. Густоев. Статистическое прогнозирование гидрометеорологических временных рядов: Учебный практикум. СПб: изд. РГГМУ, 2019. 231 с.
- 4) Ключиков Е.Ю. Инженерная океанология. Учебное пособие. СПб: Изд. РГГМИ, 1999. 294 с.
- 5) Ключиков Е.Ю. Инженерная океанология. Практические работы. СПб.: Изд. РГГМИ, 1996. 203 с.

СРАВНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТАЛЫХ ВОД АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В АКВАТОРИИ О. РУССКИЙ.

Донская А.Е., Огородников Д.М.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток

Ключевые слова: раствор хлорида натрия, раствор хлорида кальция, противогололедные материалы, талые воды, снег

Данная работа является продолжением исследований, посвященных оценке эффективности применения раствора хлорида кальция (CaCl_2) и сравнения его с раствором хлорида натрия (NaCl) в качестве противогололедного материала (ПГМ)[1]. Также в данной работе представлено исследование, целью которого является анализ физико-химических характеристик ПГМ в зимний период на автомобильных дорогах острова Русский.

Остров Русский активно осваивается и уже имеет важнейший элемент транспортной инфраструктуры – сеть автомобильных дорог. Ее эффективное функционирование является важным условием повышения уровня и улучшения условий жизни населения. В зимний период большинство транспортных проблем возникает из-за образования гололеда на дорогах, который необходимо обрабатывать ПГМ, а также проведения уборки снега во время снегопадов и после окончания выпадения осадков.

В результате применения ПГМ происходит загрязнение прилегающих к автодорогам территорий за счёт талых вод, в которых содержатся остатки реагентов. Серьезность данного явления до сих пор недостаточно изучена.

В 2023 году на базе лаборатории гидрологии суши Департамента наук о Земле Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета были проведены эксперименты, в ходе которых изучалась средняя скорость таяния снега при использовании различных концентраций растворов CaCl_2 . После этого проводился анализ физико-химических характеристик талых вод. Данный реагент применяется дорожными службами города Владивосток в виде 30% водного раствора при температуре до $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2,3]. В ходе исследования сравнивалась эффективность раствора хлорида кальция и раствора хлорида натрия (NaCl), который используется в качестве противогололедного реагента в ряде стран. Также были проведены эксперименты различных концентраций смеси растворов $\text{NaCl}*\text{CaCl}_2$. Данную смесь растворов используют в некоторых странах и отмечается их эффективное и продолжительное воздействие на снег [4].

Порядок проведения эксперимента, направленного на определение эффективности применения 30% раствора CaCl_2 в качестве ПГМ и сравнение его с 25% водным раствором NaCl , 27% и 12% растворами смеси $\text{NaCl}*\text{CaCl}_2$:

1. Охлаждение контейнеров для плавления. Выбор навески образцов растворов CaCl_2 , NaCl и $\text{NaCl}*\text{CaCl}_2$ и снега в соотношении 1 к 6;
2. Определение температуры проб снега и растворов;
3. Размещение контейнеров с пробами снега и растворами в источник постоянной отрицательной температуры, фиксирование времени размещения и температуры непосредственно в источнике;
4. Определение веса и объема образовавшегося рассола;
5. Вычисление скорости плавления;
6. Повторное измерение температуры образцов;
7. Определение физико-химических свойств полученного рассола: водородного показателя рН, солёности и относительной плотности.

В ходе эксперимента были получены данные о средней скорости плавления: CaCl_2 (30%) – 1,03 г/мин, NaCl (25%) – 2,2 г/мин, $\text{NaCl} \cdot \text{CaCl}_2$ (27%) – 0,34 г/мин, $\text{NaCl} \cdot \text{CaCl}_2$ (12%) – 0,33 г/мин. В результате можно сделать вывод, что применение 30% раствора CaCl_2 приводит к более медленному плавлению снега в сравнении с 25% раствором NaCl . Путем сравнения физико-химических свойств полученных талых вод был сделан вывод о более высокой эффективности раствора CaCl_2 в борьбе с гололедицей на дорожных покрытиях, так как раствор CaCl_2 имеет свойство намного медленнее остывать, что обеспечивает более длительный противогололедный эффект.

Растворы 27 % и 12% $\text{NaCl} \cdot \text{CaCl}_2$ имеют различные свойства плавления снега. В ходе наблюдения выявлено, что 27% раствор $\text{NaCl} \cdot \text{CaCl}_2$ в первый час растопил снег, и в последующее наблюдение снег плавился. Температура получившегося рассола быстро понизилась. Раствор 12% $\text{NaCl} \cdot \text{CaCl}_2$ в первый час совсем не расплавил снег, однако в последующие часы происходило постепенное расплавление снега, и температура рассола очень медленно снижалась. Сравнивая данные растворы, можно сделать вывод, что 27% раствор имеет лучший эффект в момент распределения вещества на снег, а 12% раствор имеет эффективное и длительное воздействие на снег.

Тревел-грант ДВФУ

Список литературы

- 1) Огородников Д.М. Оценка эффективности применения раствора CaCl_2 в качестве противогололедного материала в г. Владивосток // Материалы региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по естественным наукам. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т, 2023. С. 69-71.
- 2) Данные о заказе дорожной службой г. Владивосток хлорида кальция в качестве противогололедного материала (от 01.12.2019) – <https://star-pro.ru/proverka-kontragenta/organizatsion/1112536000774/zakupki#customer#contracts>
- 3) Рекомендации по приготовлению раствора хлористого кальция с необходимой плотностью – https://www.teh-stroy.ru/st_rastvor-hk.php
- 4) Снег: Справочник / Под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла; Пер. с англ. под ред. В. М. Котлякова. Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. 751 с.

ПЛАСТИКОВЫЕ ПЛОТЫ В ОКЕАНЕ И ИХ ОБИТАТЕЛИ

Егорова Е.Л.,¹ Стеблина Т.И.²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Национальный научный центр морской биологии им. А.В. Жирмунского" Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: пластик, плавучий мусор, расселение видов, декаподы, крабы

В 2021 году в районе подводных гор Императорского хребта НИС "Академик М.А. Лаврентьев" был обнаружен плавучий антропогенный плот, размером приблизительно 1 кв.м., сформированный на основе рыболовных сетей и состоящий преимущественно из разнородного пластикового мусора, включая рыболовные снасти, бытовые фильтры и декоративные искусственные цветы. В ходе исследования плота было выявлено сформировавшееся на нем сообщество морских организмов, доминирующим видом в котором являлись крабы рода *Planes*, а также присутствовали актинии, морские уточки и костные рыбы. В свете продолжающегося загрязнения Мирового океана данная находка проливает свет на формирование нового типа экологических систем, для которых пластик является долговечным субстратом. По современным представлениям, естественные плоты, состоящие из природных биоразлагаемых элементов (в англоязычной литературе - natural rafts), сыграли значительную роль в трансокеаническом расселении различных видов животных даже с учетом относительно недолгого срока существования отдельно взятого плота. Они предоставляют укрытие, средство перемещения и источник энергии для различных организмов. Пластиковые плоты (plastic rafts), состоящие преимущественно из отходов рыболовной индустрии, домашнего и промышленного мусора, а также предметов, смытых в море в результате природных бедствий, способны сохранять целостность значительно дольше, чем естественные плоты, а также формировать био пленки, которые могут служить источником пищи для более крупных организмов. В последние десятилетия неуклонно растущее количество пластика в океане создало условия для быстрого и массового расселения различных видов, в том числе инвазивных. Это подчеркивает необходимость дальнейшего изучения сообществ, формирующихся на подобных плотках, особенностей их образования и видового состава. Обнаружение плота в районе, характеризующем наличием уязвимых глубоководных экосистем, также поднимает вопрос о потенциальном воздействии пластика на экосистемы морского дна.

Экспедиция 2021 года финансировалась за счет гранта по проекту "Фундаментальные проблемы изучения и сохранения глубоководных экосистем в потенциально рудоносных районах Северо-Западной части Тихого океана" № гранта: 075-15-2020-796 Номер госрегистрации: АААА-А20-120120490003-8

Список литературы

- 1) Haram L.E., Carlton J.T., Centurioni L., Choong H., Cornwell B., Crowley M., Egger M., Hafner J., Hormann V., Lebreton L., Maximenko N., McCuller M., Murray C., Par J., Shcherbina A., Wright C., Ruiz G.M. Extent and reproduction of coastal species on plastic debris in the North Pacific Subtropical Gyre // Nat. Ecol. Evol. 7. 2023. P. 687–697.
- 2) Rech S., Thiel M., Pichs Y.J.B., García-Vázquez E. Travelling light: Fouling biota on macroplastics arriving on beaches of remote Rapa Nui (Easter Island) in the South Pacific Subtropical Gyre // Marine Pollution Bulletin 137. 2018. P. 119-128.
- 3) Kiessling T., Gutow L., Thiel M. Marine Litter as Habitat and Dispersal Vector // Marine Anthropogenic Litter. 2015. P. 141–181.

- 4) Chong F., Spencer M., Maximenko N., Hafner J., McWhirter A.C., Helm R.R. High concentrations of floating neustonic life in the plastic-rich North Pacific Garbage Patch // PLoS Biol 21(5). 2023. e3001646.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ПОЛИМЕРНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ БЕРЕГОВОЙ ЗОНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

Кальпа В.А., Багаев А.В.

Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: пластик, микропластик, антропогенное загрязнение, морской мусор, пятна мусора.

Морской мусор представляет собой антропогенные отходы, которые накапливаются в морских и океанических экосистемах [1]. Он включает в себя широкий спектр материалов, таких как пластик, стекло, металлы, резина и текстиль [2], которые долгое время пребывают в водной среде и причиняют значительный экологический ущерб. Морской мусор является серьезной угрозой для биоразнообразия и функционирования морской фауны и флоры.

Перед началом отбора проб с возвышенности фотографируется пляж, а также отмечается количество и геометрия «пятен мусора». Мы также фиксируем координаты местоположения с помощью ГНСС приемника с точностью до 2 метров. В протокол заносится информация о погодных условиях, уровне волнения на море и количестве людей на пляже.

Отбор образцов проводится на определенных участках пляжа, расположенных вдоль линии заплеска, где имеется скопление макрофитов. Для этого участка определяется конкретная область размером 1 метр в ширину и 10 метров в длину, которая дополнительно ограничивается цветной веревкой и кольшками. Затем осуществляется визуальная оценка и подсчет видимого антропогенного мусора различных размеров (макро-, мезо- и микро размеров) внутри прямоугольных сегментов площадью 1 квадратный метр.

Анализ собранных образцов морского мусора показал, что более 87% частиц от общего числа являлись пластиком. Средняя концентрация пластика составляла 6 частиц на м².

Для исследования наличия и концентрации химических элементов на морском мусоре мы использовали Спектроскан МАКС-GV. Аппарат предназначен для качественного и количественного рентгенофлуоресцентного анализа в соответствии с методиками выполнения измерений, аттестованными в установленном порядке, в диапазоне от натрия (11 Na) до урана (92 U) [3].

Собранные фрагменты пластикового мусора были взяты с 3 участков побережья Западного Крыма, не обрабатывались растворителями или дистиллированной водой. Увеличение концентрации тяжелых металлов по сравнению с аналогичным бытовым пластиком из магазина не обнаружено. В составе спектра пластиковых фрагментов с пляжей ожидаемо проявились Na, Cl, Ca и Si; по сравнению с «чистыми» образцами несколько уменьшилось содержание Ti. Отдельные образцы показали незначительное увеличение содержания Zn, Al, Fe и Cu.

Отбор проб с поверхности моря проводился в ходе 129 научного рейса на НИС «Профессор Водяницкий» с помощью траления нейстонной сетью типа «манта» без утяжелителей.

До или после станции (по договоренности) судно начинало свой ход на 2-3 узлах, мы опускали сеть так, чтобы она не сильно «прыгала» по волнам. Траление проводилось около 10 минут. Содержимое стакана мы сливали в специально заготовленные банки. Поверхность воды визуально, в основном, чистая, в одном месте вблизи крупного города наблюдалась полоса плавучего мусора (возможно в зоне конвергенции).

Дальнейшее исследование собранных проб будет заключаться в обнаружении микропластика и его количества.

Исследование выполнено в рамках госзадания по теме «Прибрежные исследования» № FNNN-2024-0016.

Список литературы

- 1) Iniguez M.E., Conesa J.A., Fullana A. Marine debris occurrence and treatment: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, P. 394-402.
- 2) Guideline for monitoring marine litter on the beaches in the OSPAR Maritime Area, 2010
- 3) Аппарат рентгеновский для спектрального анализа СПЕКТРОСКАН МАКС-GV Паспорт РА5.000.000 ПС 2012.

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СНИЖЕНИЯ pH МОРСКОЙ ВОДЫ НА ПРООКСИДАНТНО-АНТИОКСИДАНТНУЮ СИСТЕМУ ТИХООКЕАНСКИХ УСТРИЦ

Кладченко Е.С., Ткачук А.А., Гостюхина О.Л., Челебиева Э.С., Андреева А.Ю.

ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», г. Севастополь

Ключевые слова: антиоксидантные ферменты, активные формы кислорода, окислительный стресс, повреждение ДНК

Очевидно, что экстремальное колебание абиотических факторов прибрежных участков Мирового океана способны оказывать существенное влияние на функциональное состояние культивируемых видов, что неизбежно приведет к экономическим потерям на фермах. Считается, что снижение pH негативно воздействует на морских двустворчатых моллюсков, в первую очередь за счет изменения скорости кальцификации раковины [1]. Вместе с тем, влияние низких значений pH среды на прооксидантно-антиоксидантную систему двустворчатых моллюсков исследовано крайне слабо. В связи с чем, целью настоящей работы являлось исследование снижения pH в условиях лабораторного эксперимента на прооксидантно-антиоксидантную систему тихоокеанских устриц.

Отбор устриц *Magallana gigas* (Thunberg, 1793) проводили в июле 2022 года на ферме, расположенной в Севастопольской бухте, Крым (44°61' с.ш. и 33°50' в.д.). Взрослые устрицы с длиной раковины $120,3 \pm 0,8$ мм и массой $35,3 \pm 1,2$ г (n=150) были собраны и немедленно помещены в сухие емкости со льдом (+4 °C) для передачи в лабораторию. Моллюсков содержали в пластиковом резервуаре объемом 100 л, заполненном фильтрованной морской водой (температура $20,3 \pm 0,5$, pH $8,0 \pm 0,3$, соленость $18,1 \pm 0,4$ ‰) в течение 14-дневного периода акклиматизации к лабораторным условиям. Морскую воду фильтровали через систему фильтров, финальная фильтрация осуществлялась через фильтр с диаметром пор 0.25 мкм. Морская вода в аквариуме заменялась ежедневно. Во время акклиматизации устриц ежедневно кормили микроводорослью *Tetraselmis viridis* (R.E.Norris, Hori & Chihara, 1980) (штамм IBSS-25 из коллекции отдела биотехнологии и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ).

После завершения периода акклиматизации *M. gigas* были разделены на 2 группы: контрольная группа моллюсков (n=30, pH = 8,2) и экспериментальная группа (n=120, pH = 7,3). Заданный уровень pH создавался путем аэрации морской воды углекислым газом. Уровень pH морской воды снижался в течение 8 часов, затем поддерживался на постоянном уровне в течение всего периода эксперимента. Длительность инкубации *M. gigas* в экспериментальных условиях составила 8 дней. Отбор проб проводится на 1-е, 3-е, 6-е, и 8-е сутки. На каждой точке эксперимента отбирали пробы гемолимфы из сердечного синуса для определения способности гемоцитов к спонтанной продукции активных форм кислорода (АФК) при помощи метода проточной цитометрии и внутриклеточных повреждений ДНК при помощи комета-теста. Для исключения фактора индивидуальных особенностей, пробу гемолимфы объединяли от 3х случайных устриц внутри каждой группы. Кроме этого, при помощи стандартных биохимических методов определяли тканевую активность антиоксидантных ферментов (каталазы – КАТ, супероксиддисмутазы – СОД), а также уровень перекисного окисления липидов и окислительной модификации белков в жабрах и гепатопанкреасе.

В экспериментальной группе моллюсков, подвергшихся воздействию низких значений pH, уже на 1 сутки воздействия отмечено достоверное снижение (почти в 2 раза) внутриклеточной концентрации АФК в агранулоцитах и гиалиноцитах, относительно контрольной группы (p<0,05, n=10). Для агранулярных клеток гемолимфы (агранулоциты и гиалиноциты) снижение продукции АФК прогрессировало с течением эксперимента и отмечалось, фактически, на всех этапах

анализа ($p < 0,05$, $n = 10$). Для гранулоцитов достоверное снижение уровня продукции АФК (в 2 раза относительно контроля) выявлено только на 6 сутки экспериментального воздействия ($p < 0,05$, $n = 10$). Двустворчатые моллюски активно вырабатывают АФК в качестве сигнальных молекул для контроля таких процессов, как запрограммированная гибель клеток, реакции на абиотический стресс, системная передача сигналов, а также осуществления функции иммунного ответа [2]. Снижение уровня продукции АФК в нашем эксперименте может свидетельствовать о ингибировании энергозатратного процесса продукции АФК и перераспределения энергии на механизмы клеточной адаптации.

Генотоксический эффект воздействия закисления определялся на основании метода ДНК-комет и анализа количества ДНК в хвостах комет гемоцитов устриц. Экспериментальное закисление воды сопровождалось увеличением количества одно- и двуцепочечных разрывов ДНК в гемоцитах устриц, о чем свидетельствует достоверный рост количества ДНК в хвостах комет на всех этапах анализа данных ($p < 0,05$, $n = 10$), кроме 6 суток эксперимента. Отсутствие генотоксических повреждений на 6-е сутки эксперимента согласуется с результатами снижения уровня продукции АФК, способных повреждать клеточные структуры, такие как липиды, белки углеводы, нуклеиновые кислоты [2]. В свою очередь рост повреждений ДНК на 1, 3 и 8 сутки свидетельствует о снижении уровня антиоксидантной защиты, необходимой для предотвращения окислительных повреждений.

Экспериментальное моделирование закисления также существенно влияло на активность КАТ и СОД в тканях. При закислении среды в жабрах активность КАТ достоверно не менялась, а активность СОД, в свою очередь, достоверно повышалась на 3-е и 6-е сутки – в 1,5 и 1,7 раза соответственно ($p \leq 0,01$, $n = 10$), а затем, восстанавливалась до контрольного уровня на 8 сутки эксперимента. В гепатопанкреасе, как и в жабрах, активность КАТ также не менялась в период эксперимента. В жабрах устриц, содержавшихся в воде пониженной кислотностью, отмечено достоверное увеличение концентрации ТБК-активных продуктов на 6 и 8 день эксперимента ($p \leq 0,01$, $n = 10$). В гепатопанкреасе устриц также отмечено усиление процессов перекисного окисления липидов при длительном содержании в условиях закисления воды.

Таким образом, при снижении pH выявлены признаки развития окислительного стресса, зависящие от времени экспозиции в условиях экспериментальной ацидификации, как в гемоцитах, так и в тканях устриц.

Работа выполнена в рамках госзадания 121102500161-4 «Закономерности организации иммунной системы промысловых гидробионтов и исследование влияния факторов внешней среды на функционирование их защитных систем».

Список литературы

- 1) Zhao, X., Shi, W., Han, Y., Liu, S., Guo, C., Fu, W., Liu, G. Ocean acidification adversely influences metabolism, extracellular pH and calcification of an economically important marine bivalve, *Tegillarca granosa* // Marine Environmental Research 125. 2017. P. 82-89.
- 2) Jakubczyk K., Dec K., Kałduńska J., Kawczuga D., Kochman J., Janda K. Reactive oxygen species-sources, functions, oxidative damage // Polski merkuriusz lekarski: organ Polskiego Towarzystwa Lekarskiego 48(284). 2020. P. 124-127.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НЕФТЕПРОЯВЛЕНИЙ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ЗА 2020–2023 ГГ.

Клименко С.К.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Ключевые слова: Черное море, Азовское море, естественные нефтепроявления, космическая радиолокация, спутниковый мониторинг

Одним из актуальных научных направлений является изучение нефтегазоносности Мирового океана. Через выходы естественных нефтепроявлений на морскую поверхность производится поиск новых месторождений нефти и газа [1], а методы дистанционного зондирования наиболее эффективный способ поиска подобных природных источников.

Приводятся результаты спутникового мониторинга естественных нефтепроявлений акваторий Азовского и Черного морей, целью которого был поиск новых природных источников нефтяных углеводородов. Основными данными для их обнаружения и идентификации стали радиолокационные изображения (РЛИ) европейских спутников Sentinel-1A и Sentinel-1B, в дополнение к которым использовались доступные оптические снимки Sentinel-2 и Landsat-8, покрывающие Азово-Черноморский бассейн. В задачи исследования входил сбор материала по пятнам естественных нефтепроявлений, их анализ и установление новых мест высачивания нефти на поверхность моря.

В ходе наблюдений с 2020 г. был обнаружен ряд естественных нефтепроявлений в нескольких районах: грузинском и турецком секторах Черного моря [1] (как в территориальных водах, так и вне их), на прикерченском и присевастопольском участках шельфа/континентального склона [2], на северо-западном мелководном шельфе [3,4], а также в Азовском море близ Керченского предпроливья [5]. Пятна тяготели к одним и тем же источникам, формируя пространственно-временную группировку на последовательных разновременных изображениях, характерную для природных источников. Путем выделения групп этих пятен с помощью геоинформационного (ГИС) подхода были выявлены как ранее известные источники естественных нефтепроявлений (например, в акватории напротив г. Поти, Грузия [1]), так и обнаружены новые – в западной шельфовой зоне Крыма. Кроме того, радиолокационный мониторинг показал изменчивость в периодичности появления пятен природных нефтепроявлений на поверхности моря в некоторых известных акваториях. Например, в прикерченской части Крымского полуострова пятна нефтепроявлений в 2022–2023 гг. наблюдались реже по сравнению с периодом 2015–2017 гг.

Гидрометеорологические условия в осенне-зимние сезоны мешали определять характеристики природных источников по их поверхностным проявлениям, однако анализ радиолокационных данных за период исследования позволяет не только детально наблюдать источники нефтепроявлений и их активность, но и выявлять новые, которые ранее не были описаны или появились вновь.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования России (тема № FMWE-2024-0015)

Список литературы

- 1) Евтушенко Н.В., Иванов А.Ю. Нефтепроявления в юго-восточной части Черного моря по данным космической радиолокации // Исследование Земли из космоса 3. 2012. С. 24–30.
- 2) Клименко С.К., Иванов А.Ю., Терлеева Н.В. Пленочные загрязнения Керченского пролива по данным пятилетнего радиолокационного мониторинга: современное состояние и основные источники // Исследование Земли из космоса 3. 2022. С. 37–54.

- 3) Круглякова Р.П., Круглякова М.В., Щевцова Н.Т. Геолого-геохимическая характеристика естественных проявлений углеводородов в Черном море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана 1. 2009. С. 37–51.
- 4) Шнюков Е.Ф., Пасынков А.А., Любицкий А.А., Иноземцев Ю.И., Рыбак Е.Н., Кузнецов А.С. Грязевые вулканы на Прикерченском участке шельфа и материкового склона Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана 3. 2010. С. 28–36.
- 5) СКАНЭКС, 2020. В Азовском море обнаружен подводный источник нефтеуглеводородов https://www.scanex.ru/company/news/v-azovskom-more-obnaruzhen-podvodnyy-istochnik-nefteuglevodorodov/?sphrase_id=21204&sphrase_id=21204

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИДА *SCENEDESMUS QUADRICAUDA* ДЛЯ БИОТЕСТИРОВАНИЯ ПРИ НИЗКОМ И УМЕРЕННОМ УРОВНЯХ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Лазарева А.М., Ипатова В.И.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Ключевые слова: *Scenedesmus quadricauda*, биотестирование, соленость, минерализация, зеленые водоросли

Пресноводные водоросли часто культивируют для получения из них ценных веществ и сырья для биотоплива, применяя солевой стресс для интенсификации процессов, направленных на увеличение получаемых продуктов [1, 2]. Тем не менее, еще не разработаны методики использования пресноводных микроводорослей для проведения процедуры биотестирования на средах с низким и умеренным уровнями минерализации.

Таким образом, целью работы стало изучение перспективы использования альгологически чистой культуры зеленой водоросли *Scenedesmus quadricauda* (Turp.) Breb. (= *Desmodesmus communis* E. Hegew.) в качестве тест-объекта для оценки сред с минерализацией 1-6 промилле.

Культуру выращивали на среде Успенского №1 (состав, г/л: 0,025 KNO₃; 0,025 MgSO₄; 0,1 KN₂PO₄; 0,025 Ca(NO₃)₂; 0,0345 K₂CO₃; 0,002 Fe₂(SO₄)₃; pH 7,0-7,3) в климатостате при освещенности 3,5 клк со сменой дня и ночи (12:12 ч) при температуре 23±1,5°C [3]. В качестве основы для приготовления среды Успенского №1 использовали дистиллированную воду для контрольных повторностей, а для опытных – растворы с заданным уровнем минерализации, в которые производили добавки питательных солей по прописи среды Успенского №1.

Хронические опыты длительностью 14 сут проводили в конических колбах, в которые добавляли 50 мл среды, в четырех повторностях для каждого исследуемого уровня минерализации и контроля. Основным показателем состояния культуры *S. quadricauda* служило изменение численности клеток, которую подсчитывали в счетной камере Горяева под световым микроскопом и величины эффективности фотосинтеза, измеряемой при помощи флуориметра AquaPen.

Нормальность распределения полученных значений оценивали по критерию Колмогорова-Смирнова. Оценку статистической значимости различий контрольной и опытных выборок проводили с использованием t-критерия Стьюдента для выборок с различными дисперсиями ($p < 0,05$).

На 1 сут опыта отмечена стимуляция роста при всех испытанных уровнях минерализации, при этом в присутствии 1, 2,5 и 4 г/л стимуляция была статистически достоверна, превышая контрольные значения на 32% в повторностях с наименьшим испытанным уровнем минерализации. Однако уже с 3 сут наблюдали снижение численности по отношению к контролю, которое сохранялось до конца эксперимента. Такое угнетение роста, хотя и было достоверным, однако оно не превышало порога токсичности в 20%, при этом наблюдали стабильный и достаточно интенсивный рост численности клеток в культуре, поэтому культура *Scenedesmus quadricauda* может быть рекомендована для проведения процедуры биотестирования при всех испытанных уровнях минерализации среды.

Величина эффективности фотосинтеза культуры *Scenedesmus quadricauda* была изучена на 1 и 3 сут эксперимента. На 1 сут при 6 г/л отмечено слабое недостоверное угнетение (на 5,7%), которое на 3 сут эксперимента сменилось небольшой достоверной стимуляцией (на 4,4%). Все остальные исследованные уровни минерализации среды вызывали стимуляцию исследуемого показателя (в пределах 5-13%), что свидетельствует о хорошем физиологическом состоянии клеток водоросли в опытных солевых растворах.

По результатам опытов с бихроматом калия расчетная величина ЭК₅₀ K₂Cr₂O₇ за 3 сут для культуры *S. quadricauda* на среде Успенского №1 с минерализацией 2,5 г/л составила 12,99 мг/л.

Интересно отметить, что сравнение темпов роста культур *S. quadricauda* на среде Успенского с уровнем минерализации 2,5 г/л показало отсутствие отличий в темпах роста адаптированной к заданному уровню минерализации (два последовательных пересева) и неадаптированной (исходной) культуры.

Работа выполнена в рамках Государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова (тема № 121032300131-9) и темы НИР «Определение научно-обоснованных принципов выбора тест-видов живых организмов и параметров оценки токсичности водно-солевых систем, содержащих производственные отходы со средним уровнем минерализации, для мониторинга состояния экосистем и минимизации воздействий предприятий на окружающую среду» при финансовой поддержке хоздоговора (№ 6.22/8000497286).

Список литературы

- 1) Liu N., Mou Y., Su K., Li X., Lu T., Yan W., Song M., Yu Z. The effect of salinity stress on the growth and lipid accumulation of *Scenedesmus quadricauda* FACHB-1297 under xylose mixotrophic cultivation // *Process Safety and Environmental Protection* 165. 2022. P. 887–894.
- 2) Salama E.S., Kim H.C., Abou-Shanab R.A. Biomass, lipid content, and fatty acid composition of freshwater *Chlamydomonas Mexicana* and *Scenedesmus obliquus* grown under salt stress // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 36. 2013. P. 827–833.
- 3) Соколова М.В. Методические указания по разработке нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения / М.: ВНИРО, 2011. 165 с

ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ДОННЫХ ОСАДКОВ АВАЧИНСКОГО ЗАЛИВА МЕТОДОМ БИОТЕСТИРОВАНИЯ НА ОСНОВАНИИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ МИКРОВОДОРОСЛИ *PHAEODACTYLUM TRICORNUTUM* BOHLIN

Лобанова Т.Р., Журавель Е.В.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: биотестирование, Авачинский залив, донные осадки.

Экосистемы севера Дальнего Востока России характеризуются высокой чувствительностью к каким-либо воздействиям, имеют длительный период восстановления, и при этом играют важную роль в функционировании биосферы. Водные экосистемы наиболее «хрупкие» в этом плане. Так, осенью 2020 г. у побережья Камчатского полуострова в Авачинском заливе была зафиксирована массовая гибель гидробионтов, вызванная вредоносным цветением микроводорослей. В связи с этим большее значение приобретает изучение особенностей функционирования экосистем Авачинского залива, мониторинг их состояния и оценка антропогенного воздействия. В рамках мониторинговых исследований, начатых в 2020 г., было проведено биотестирование донных осадков, отобранных летом 2022 г. в следующих районах: б. Лиственичная, б. Вилючинская, Авачинская губа, Халактырский пляж и северная часть Авачинского залива.

Оценка токсичности проводилась по результатам биотестирования водной вытяжки из донных осадков с использованием микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum* Bohlin. Основные фиксируемые тест-реакции – изменение численности клеток и концентрации хлорофилла *a* в клетках в остром (72 ч.) и кратковременном хроническом (7 сут.) экспериментах [1, 2].

Наблюдение за ростом численности клеток показало его ингибирование в пробах практически со всех станций. Значительное ингибирование наблюдалось для проб из кутовой части б. Вилючинская, Авачинской губы и со станций в северной части залива. В то же время в одной из проб из Авачинской губы наблюдалась и стимуляция роста численности культуры, что может быть обусловлено различными физико-химическими характеристиками тестируемых осадков [3].

При анализе воздействия вытяжки из донных осадков на концентрацию хлорофилла *a* в клетках микроводоросли наибольшее снижение содержания фотосинтетического пигмента наблюдалось для донных осадков в районе выхода р. Островная в северной части Авачинского залива, кутовой части б. Вилючинская и у устья р. Налычева.

Сопоставляя результаты биотестов с данными о гранулометрическом составе проб [3], можно проследить зависимость между размером частиц и угнетением микроводорослей. Установлено, что увеличение токсичности сопряжено с преобладанием в тестируемых донных осадках мелко-размерных фракций. Так, значительное ингибирование наблюдалось в пробах из кутовой части б. Вилючинская и Авачинской губы, где распространены мелкоалевритовые илы.

По результатам эксперимента высокая токсичность донных осадков для *P. tricornutum* выявлена в кутовой части б. Вилючинской, Авачинской губе, у устья р. Налычева (Халактырский пляж) и в северной части залива у устья р. Островная; слаботоксичные – в б. Лиственичной и средней части б. Вилючинской; нетоксичные – в открытой части б. Вилючинской, у устья р. Котельной (серединая часть Халактырского пляжа), у м. Налычева и у устья р. Вахиль (северная часть залива).

Полученные результаты лишь частично можно объяснить антропогенным воздействием на исследованные акватории. Известно, что в Авачинскую губу постоянно поступают загрязнённые сточные воды как из береговых источников, так и от водного транспорта, что обуславливает загрязнение бухты биогенными и органическими веществами, нефтяными углеводородами и фенолами [4]. При этом значимые источники загрязнения антропогенного происхождения в б. Вилючинской и северной части Авачинского залива отсутствуют. Здесь повышенная токсичность донных

осадков может быть вызвана природными особенностями региона – изменением химического состава воды и донных осадков вследствие вулканической активности и вулканического генезиса грунтов, особенностями гидрологического режима, действием речного стока.

Исследование проводилось при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FZNS-2022-0001 «Исследование природных и антропогенных воздействий на пресноводные и эстуарные экосистемы п-ова Камчатка методами биоиндикации и биотестирования».

Список литературы

- 1) Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов. М., РЭФИА, НИА Природа, 2002. 118 с.
- 2) ГОСТ 17.1.4.02-90 Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. М.: ИПК Издательство стандартов, 1990. 15 с.
- 3) Шалимова О.Г. Изучение гранулометрического состава и органического углерода аквапчв Авачинского залива // Материалы Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по естественным наукам / Отв. ред. В.Ю. Ермаченко. Владивосток: Дальневосточный федеральный университет, 2023. Режим доступа: https://pureportal.spbu.ru/files/107952538/_2023.pdf.
- 4) Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2021 году». Петропавловск-Камчатский: Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края, 2022. 405 с.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АТОМАРНОЙ РТУТИ НАД АКВАТОРИЕЙ МОРЕЙ ВОСТОЧНОЙ АЗИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Лопатников Е.А., Калинин В.В., Иванов М.В.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия

Ключевые слова: атомарная ртуть, трансграничный перенос, источники ртути, SWT анализ, моря востока Азии

Ртуть - это стойкое и токсичное химическое вещество, которое может биоаккумулирующееся и отрицательно сказаться на здоровье человека. Особое внимание уделяется атомарной ртути $Hg(0)$, которая может попадать в атмосферу и переноситься в ней на дальние расстояния в течении долгого периода, вплоть до года [1]. Повышение содержаний ртути в атмосфере связаны с началом индустриального периода. Азиатский регион вносит наибольший вклад в эмиссию атомарной ртути в атмосферу, лидером является Китай [2]. Ранее неоднократно фиксировался атмосферный перенос $Hg(0)$ в Японское море из Китая и региона Жёлтого моря [3]. Однако мало исследований посвящены зимнему периоду который отмечается повышенной эмиссией $Hg(0)$ в атмосферу из-за сжигания Hg -содержащего угля в связи с начала отопительного сезона.

В работе используются измерения содержаний $Hg(0)$ в приземной атмосфере в Японском и Восточно-Китайском морях, полученные в 88 рейсе НИС «Академик Лаврентьев» в октябре-декабре 2019 г. в два этапа: при переходе из порта Владивосток в Южно-Китайское море и обратно. Измерения выполнялись с помощью атомно-абсорбционного анализатора ртути RA-915M (ООО «Люмэкс, г. Санкт-Петербург» с пределом обнаружения 0.3 нг/м^3 по ранее отработанной методике [3]. Показания прибора усреднялись за 1 минуту с контролем нуля каждые 5 минут, для демонстрации пространственного и временного распределения результаты усреднялись до 30 минутных интервалов, а для проведения анализа траекторий с взвешенной концентрацией (Concentration-weighted trajectory (CWT)) - за каждый час. Основные метеопараметры: температура, влажность, давление, осадки, солнечная радиация, скорость и направление ветра определялись каждые 30 мин с помощью метеостанции Davis Vantage Pro (Davis Instruments Corp., США).

Для получения обратных траекторий использовалась хорошо описанная система HYSPLIT с метеорологической базой данной GDAS1 с опцией ансамбля [3-5]. Она позволяет получить 27 возможных траекторий из точки измерения. Моделировались 72-часовые обратные траектории движения воздушных масс для каждого часа исследуемого периода, таким образом было смоделировано 8.343 одиночных обратных траекторий.

В CWT анализе каждая обратная траектория движения воздушных масс в момент измерения связывается с полученной в этот момент концентрацией $Hg(0)$. Более подробно метод анализа описан в работе [3]. Для фильтрации выбросов учитывались только те значения CWT_{ij} в которых было пересечение как минимум двух траекторий движения воздушных масс

Анализ проведен в высоком разрешении $0,1 \times 0,1^\circ$, что позволило более четко локализовать регионы источники. На корейском полуострове четко выделяется юго-восточная часть. По данным [1] в этом регионе нет крупных источников ртути, однако ранее было обнаружено, что на регион имеет большое влияние трансграничный перенос $Hg(0)$ из северных районов Китая [5]. Представление данные CWT анализа совпадают с результатами PSCF (метод потенциального вклада источника) описывающим перенос $Hg(0)$ с региона северного и восточного Китая [5].

Для сравнение регионального вклада в эмиссию $Hg(0)$, результаты CWT анализа были подвержены геообработке, таким образом были получены медианные значения CWT в пределах границ

регионов. Для Северо-Восточного, Южно-Центрального Китая и России покрытие смоделированными 72 часовыми обратными траекториями движения воздушных масс не превышает 15% территории, что говорит о слабой достоверности анализа для данных регионов. Однако среди регионов с % покрытия обратными траекториями >60% повышенные значения СWT наблюдаются над территорией восточного Китая (1,49 нг/м³), что скорее всего связано с лидерством региона по выбросам антропогенной ртути [2]. Стоит отметить, что Японское море, Желтое море и Восточно-Китайское близки по полученным медианным значениям СWT (от 1.22 до 1.24 нг/м³), исключение Корейский залив (1.35 нг/м³), но через него неоднократно фиксировался перенос Hg(0) с северных районов Китая на Корейский полуостров, что скорее всего и повлияло на повышенные значения СWT.

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Минобрнауки РФ (проект 121021700342-9)

Список литературы

- 1) AMAP/UNEP. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment. 2013, 263 p.
- 2) Zhang L., Wang S., Wang L., Wu Y., Duan L., Wu Q., Wang F., Yang M., Yang H., Hao J., Liu X. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China // *Environ. Sci. Technol.* 49(5). 2015. P. 3185–3194.
- 3) Kalinchuk V.V., Lopatnikov E.A., Astakhov A.S., Ivanov M.V., Hu L. Distribution of atmospheric gaseous elemental mercury (Hg (0)) from the Sea of Japan to the Arctic and Hg (0) evasion fluxes in the Eastern Arctic Seas // *Sci. Total Environ.* 753. 2020. P. 142003.
- 4) Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F., Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96. 2015. P. 2059–2077.
- 5) Liu C., Fu X., Zhang H., Ming L., Xu H., Zhang L., Feng X. Sources and outflows of atmospheric mercury at Mt. Changbai, northeastern China // *Sci. Total Environ.* 663. 2019. P. 275–284.

АДАПТИВНЫЕ РЕАКЦИИ РАННИХ СТАДИЙ РАЗВИТИЯ *FUCUS DISTICHUS* (RHAEORHUSACEAE) В ОТВЕТ НА НЕФТЯНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ

Мартыненко Д.О., Климова А.В

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский

Ключевые слова: Авачинская бухта, нефтепродукты, *Fucus distichus*

Нефтяное загрязнение прибрежных вод является актуальной проблемой в контексте защиты и сохранения морских экосистем. На Дальнем Востоке России среди акваторий и районов морских портов, в которых осуществляют контроль уровня загрязнения среды, является Авачинская губа. Бухта расположена на юго-восточном побережье Камчатки и относится к высшей категории рыбохозяйственного значения, но несмотря на это нефть и нефтепродукты (НП) здесь остаются на протяжении более полувека одними из приоритетных загрязнителей [1]. Так, в 2023 г. в прибрежных водах бухты были определены значительные колебания этого загрязнителя – от менее 0,02 до 8,57 мг/л (от менее 1ПДК до 171,4ПДК, соответственно), при среднем уровне 1,88 мг/л (37,6ПДК) [2]. Такое содержание НП в среде в совокупности с другими видами антропогенного воздействия на прибрежные экосистемы безусловно сказывается на их видовом составе.

Несмотря на коренную трансформацию сообществ макроводорослей у северо-восточного побережья Авачинской губы, здесь в литоральной зоне до сих пор доминирует бурая многолетняя водоросль *Fucus distichus* subsp. *evanescens*. Этот вид играет важную роль в формировании сложной структуры морской растительности и условий обитания прибрежных гидробионтов [3]. Поэтому целью настоящей работы являлось выявление адаптивных реакций проростков *F. distichus* к избытку НП в условиях лабораторного выращивания.

Отбор исходных водорослей *F. distichus* для постановки эксперимента проводили в Авачинской губе в районах с разной степенью антропогенного воздействия – высокой, в прибрежной зоне у сопки Никольской и низкой (фоновый участок), на литорали бухты Шлюпочной. Лабораторные культуры водорослей получали отдельно для каждой популяции согласно методу, предложенному Т. Мотомуро [4] с дополнениями [5]. Учитывая зарегистрированные концентрации загрязнителя во всей бухте, для проведения эксперимента по определению адаптивных реакций проростков *F. distichus* к нефтяному загрязнению были выбраны концентрации НП в среде 2 и 20 мг/л (40 и 400 ПДК, соответственно). Эмульсию НП готовили на основе IMR-среды и дизельного топлива.

Проростки *F. distichus* выращивали в искусственных условиях при 8°C, естественном освещении и фотопериоде 8:16 в течение 44 суток. Культуры водорослей развивались в IMR-среде без добавления НП (контрольная группа) и в средах с содержанием загрязнителя 2 и 20 мг/л (испытываемые группы). Замену культуральных сред проводили ежедневно, измерения линейных размеров проростков – каждые 3–4 сут, при этом в последнюю неделю эксперимента все группы водорослей выращивали в средах без внесения НП. Наблюдения за развитием *F. distichus* проводили с помощью инвертированного микроскопа Olympus IX73 с фотокамерой DP73. Количество измеренных водорослей составляло 50 для каждой испытываемой и контрольной групп.

В обеих лабораторных культурах до 22-х суток эксперимента отставание в скорости роста между контрольными и испытываемыми группами с добавлением НП были незначительными. Отставание в скорости роста между контрольной группой и испытываемыми группами в это время достигало 18% у популяции из прибрежной зоны с. Никольская и 15% – б. Шлюпочная. При этом несмотря на одинаковые условия проведения эксперимента линейные размеры водорослей между популяциями так же отличались: в первые сутки длина проростков из района с. Никольская в среднем составляла 374,8 мкм и из района б. Шлюпочная – 318,7 мкм.

К концу эксперимента проростки контрольной группы, полученные от водорослей литоральной зоны с. Никольская достигали 860 мкм, в испытываемых культурах с концентрацией НП 2 мг/л

– в среднем 725 мкм и с концентрацией НП 20 мг/л – 650 мкм. Отставание в скорости роста водорослей в испытуемых группах составило 20-32% от контроля. Водоросли в тестируемых группах развивались с типичной для этого вида морфологией, при этом, как и в контрольной группе, у большинства проростков формировался хорошо выраженный главный ризоид. Аномалии, связанные с нарушением оси роста водорослей, встречались редко (менее 3%) и только при максимальном содержании НП.

Иная ситуация наблюдалась в лабораторной культуре *F. distichus*, полученной от водорослей из фонового района (б. Шлюпочная). К концу эксперимента длина проростков в контрольной группе достигала 621,6 мкм, в культурах с концентрацией НП 2 мг/л – 466,1 мкм, с концентрацией НП 20 мг/л – 418 мкм. Отставание в скорости роста здесь составило 25-33% от контроля. Ювенильные водоросли формировали разветвленные ризоиды, при этом аномалии, связанные с нарушением развития оси роста у эмбрионов, встречались в этой культуре чаще (от 2 до 13%).

Выполненное исследование выявило крайне высокий диапазон устойчивости ранних стадий развития бурой водоросли *F. distichus* к нефтяному загрязнению (до 400ПДК) в обеих популяциях, произрастающих как в условиях постоянного нефтяного загрязнения, так и фоновом районе. При этом для популяции водорослей, выделенной из бухты Шлюпочной, характерны низкие темпы роста и иная морфология ризоидальной части проростка. Продолжение исследований адаптивных реакций этого вида к тестируемому загрязнителю позволит прогнозировать изменения численности его популяции в Авачинской губе после аварийных разливов НП.

Список литературы

- 1) Доклад о состоянии окружающей среды в Камчатском крае в 2021 году. Министерство природных ресурсов и экологии Камчатского края. Петропавловск-Камчатский, 2022. 405 с.
- 2) Мартыненко Д.О., Климова А.В. Воздействие высокого уровня загрязнения нефтепродуктами водной среды на развитие водоросли *Fucus distichus* subsp. *evanescens* (Phaeophyceae) // Современные аспекты рыбохозяйственной науки и геномные технологии в аквакультуре и рыболовстве: материалы IV научной школы-конференции молодых ученых и специалистов. М.: ВНИРО, 2023. С. 56.
- 3) Клочкова Т.А., Кашутин А.Н., Климова А.В., Клочкова Н.Г. Биология развития и экология бурой водоросли *Fucus distichus* в прибрежных водах Камчатки // Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2021. 128 с.
- 4) Motomura T. Electron and immunofluorescence microscopy on the fertilization of *Fucus distichus* (Fucales, Phaeophyceae) // *Protoplasma* 178. 1994. P. 97-110.
- 5) Климова А.В., Кашутин А.Н. Раннее развитие камчатских представителей *Fucus evanescens* (Phaeophyceae, Fucales) в условиях лабораторного культивирования // Вестник КамчатГТУ 37. 2016. С. 50–56.

МОНИТОРИНГ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА (CH₄) НАД АРКТИЧЕСКИМИ МОРЯМИ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД С 2018 ПО 2022 ГОДЫ.

Муравья В.О.¹ Панкратова Н.В.², Великов И.Б.², Скороход А.И.², Новигатский А.Н.¹,
Флинт М.В.¹

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва

²Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

Ключевые слова: метан, Арктика, парниковый эффект, экспедиционные наблюдения

Метан (CH₄) — один из основных парниковых газов. Увеличение его концентрации в атмосфере, так же как углекислого газа (CO₂), водяного пара (H₂O), закиси азота (N₂O) и озона (O₃), приводят к парниковому эффекту, вызывающему глобальное потепление. Среди газов, эмиссия которых в атмосферу усилилась в последнее время, атмосферный метан — второй по значимости в наблюдаемое потепление после CO₂ [1, 2]. По имеющимся данным, в настоящее время, рост концентрации метана в атмосфере превышает рост углекислого газа [2]. Климатическое значение метана усугубляется его большим радиационным форсингом, активность CH₄ по удержанию тепла в атмосфере на два порядка превышает активность CO₂ [3]. Одним из природных источников метана в атмосфере является его эмиссия из тундровых озер, превосходящая эмиссию CH₄ с поверхности мирового океана, которая оценивается в 5–7 Мт/год [1]. В Арктическом регионе значимым источником метана являются эпиконтинентальные Сибирские моря и его эмиссия из донных отложений.

На протяжении последних 5 лет, в ежегодных экспедициях Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН проводились измерения концентраций метана в приводном слое атмосферы. В 72-м (август-сентябрь 2018г.), 76-м (июль 2019г.), 81-м (сентябрь 2020г.), 83-м (июнь 2021г.) и 89-м (сентябрь-октябрь 2022г.) рейсах научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» («АМК»). Маршруты всех экспедиций охватывали Белое, Баренцево и Карское моря. Параллельно с измерениями малых газовых составляющих атмосферы велась запись метеорологических показаний, таких как температура воздуха, скорость и направление ветра, атмосферное давление и др. Измерения метана в экспедициях ИО РАН ведутся с 2015 г., но в данной работе рассмотрим сравнение последних 5 лет экспедиционных исследований. Подобный временной срез (с 2018 по 2022 гг) позволил отследить изменения в различные летние месяцы и при различных атмосферных условиях

Для проведения наблюдений на борт судна был установлен специально разработанный Институтом физики атмосферы им. Обухова РАН автоматизированный измерительный комплекс [4]. В состав модуля входили анализатор изотопного состава метана типа G2132-i производства компании Picarro Inc. (США) и ультразвуковая метеостанция AIRMAR 150WX. Принцип действия газоанализатора основан на т.н. спектроскопии временизатухания резонатора (СВЗР) (англ. cavity ring-down spectrometry, CRDS), а особенностью прибора является способность проводить измерения на фоновых уровнях концентраций, характерных для незагрязненной атмосферы. Исследуемый воздух подавался в приборы комплекса по тефлоновому трубопроводу с внутренним диаметром около 3 мм при расходе воздуха порядка 2-3 л/мин. Воздухозаборники трубопроводов закреплялись на палубе рулевого мостика на высоте 18,5 м над урезом воды. Собственно весь комплекс размещался в одном из помещений судна на палубе рулевого мостика. Данные по всем показателям записывались с частотой один раз в минуту.

По итогам 5 экспедиций на НИС АМК проведенных в 2018-2022 годах были проанализированы данные наблюдений за концентрацией метана в приводном слое атмосферы. Это позволило получить оценки концентрации газа в летние месяцы, в сентябре и в начале октября. Диапазон концентраций CH₄ варьировался от 1,83 ppm до 3,54 ppm. Максимальные значения концентрации

были зафиксированы в 72-м рейсе НИС АМК, который проходил в августе-сентябре 2018 года. Минимум наблюдался в 76-м рейса НИС АМК в июле 2019 года. Проанализировав скорость и направление ветра можно предположить, что концентрации метана в приводном воздухе в арктических морях определяется, главным образом, процессами переноса воздушных масс. Повышенные концентрации CH_4 , которые наблюдались в центральной части Карского моря в разные годы, предположительно, были связаны с процессами выноса воздушных масс с северных материковых районов Европейской территории России [5]. В проведенных экспедициях не было зарегистрировано морского района с постоянно высокими концентрациями метана в приводной атмосфере. Это позволяет говорить об отсутствии района, где бы метан стабильно выходил из водной толщи, то есть из донных осадков.

Авторы благодарят экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш» и его капитана Горбача Ю. Н. за постоянную помощь в проведении полевых исследований.

Соглашение №169-15-2023-002 (проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ»)

Список литературы

- 1) Кароль И. Л., Киселев А. А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа 7. 2004. С. 47–52.
- 2) Доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата. 2022.
- 3) <http://www.esrl.noaa.gov>, дата обращения 21 декабря 2023г.
- 4) Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Скороход А.И., Белоусов В.А., Муравья В.О., Флинт М.В., Березина Е.В., Новигатский А.Н. Концентрация метана и значения $\delta^{13}\text{C}$ в метане над арктическими морями летом и осенью 2020 г. // Океанология 62(6). 2022. С. 869-877.
- 5) Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V., Muravya V., Flint M.V. Ship-Borne Observations of Atmospheric CH_4 and $\delta^{13}\text{C}$ Isotope Signature in Methane over Arctic Seas in Summer and Autumn 2021 // Atmosphere 13(3). 2022. 458.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА БИОТЕСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТОКСИЧНОСТИ ГРУНТОВ АКВАТОРИЙ С РАЗНЫМ УРОВНЕМ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ

Пичуева А.С., Пелех А.Д., Шестёра А.А.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: биотестирование, донные отложения, токсичность

Загрязнение Мирового океана постоянно возрастает, при анализе качества морской среды привлекается внимание в настоящее время уделяется методам биотестирования. Под биотестированием (от англ. bioassay) понимают процедуру установления токсичности среды (оценки действия факторов среды, в том числе и токсических) с помощью живых организмов (тест-объектов). Токсичность среды – это одна из ее интегральных характеристик, обусловленная проявлением негативных для биоты свойств химических веществ, присутствующих в испытываемой среде и проявляющих синергетическое, антагонистическое и аддитивное действие. Таким образом, биотестирование, в отличие от физико-химических методов, не позволяет напрямую выявить перечень и концентрацию загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды, однако по состоянию биоты можно предсказать возможные изменения в экосистемах на данном уровне загрязнения. Кроме того, важно отметить, что для ряда компонентов окружающей среды (например, почва и донные отложения) нормативы установлены для узкого перечня загрязняющих веществ, что затрудняет их адекватную экологическую оценку.

Пробы донных отложений отобраны водолазом при помощи дночерпателя на глубине не менее 3 м на 6 станциях в б. Новик (июль 2021 г.), 14 станциях на акваториях, относящихся к Дальневосточному морскому заповеднику – бухты Астафьева и Средняя (июль 2022 г.) и 4 станциях в б. Киевка (август 2023 г.). Процедура биотестирования с использованием микроводоросли *Phaeodactylum tricornutum* и ракообразного *Artemia salina* проводилась в соответствии с Руководством [1]. Опыты проводили в трех повторностях в течение 7 суток для водорослей и 72 часов для рачков, оценивая острую и хроническую токсичность вытяжек для микроводорослей. Вытяжку донных отложений считали нетоксичной, если численность клеток микроводорослей относительно контроля (выживаемость артемий) составляла 90-100%, слаботоксичной – 65-89%, среднетоксичной – 50-64%, высокотоксичной – 0-49% [2]. Для микроводорослей также рассчитывали относительное отклонение численности в пробах от контроля Ит, вытяжку считали токсичной при значении $Ит \geq 50\%$ [1]. Результаты экспериментов обрабатывались с помощью Microsoft Excel.

Сточные воды студенческого городка ДВФУ перекачиваются на канализационные очистные сооружения в пос. Лесное, откуда сбрасываются на рельеф и постепенно стекают в вершину б. Новик [3]. Несмотря на строгий заповедный режим и ограничение хозяйственной деятельности, происходит привнос загрязняющих веществ на территорию ДВГМЗ с течениями, атмосферными потоками, в результате судоходства [4]. Бухта Киевка практически не подвержена антропогенному загрязнению, но ее мелководность, открытость и пресноводный сток крупной р. Киевка могут сказываться на состоянии данной акватории [5].

В результате проведенных экспериментов выявлено, что ни для одной из станций в пределах б. Новик не зафиксирована смертность артемий свыше 10 %, что свидетельствует об отсутствии токсического воздействия. В остром эксперименте практически для всех станций (за исключением м. Ермолаева при 72 и 96 часах экспозиции и б. Труда при 96 часах экспозиции) зафиксировано стимулирование роста численности *Ph. tricornutum* относительно контроля. При этом стимуляция превышает 50 % для м. Тупой, м. Экипажный и м. Шигина, что, вероятно, связано с высоким содержанием органических и биогенных веществ в грунтах б. Новик. Однако к концу эксперимента

водные вытяжки со всех станций оказывали ингибирующий эффект (вытяжку с б. Труда можно считать среднетоксичной, вытяжки с остальных станций – высокотоксичными). Величина Ит для всех проб к концу эксперимента превысила 50 %, что говорит о наличии хронического токсического эффекта. Это, очевидно, обусловлено накоплением загрязняющих веществ-токсикантов в донных отложениях б. Новик.

Выживаемость *A. salina* в водных вытяжках из грунтов бухт Астафьева и Средняя для всех станций превысила 90 %, что свидетельствует об отсутствии токсического воздействия. Для ряда станций в пределах ДВГМЗ в остром эксперименте отмечено угнетение роста численности микроводоросли относительно контроля. Также после фильтрации присутствовала тонкая взвесь, препятствовавшая нормальному росту культуры: угнетение роста численности феодактилюма обусловлено ошибкой эксперимента. К концу эксперимента численность *Ph. tricornutum* в водных вытяжках со всех станций превысила 90 % от контрольной, что свидетельствует об отсутствии токсического воздействия и подтверждает влияние наличия тонкой взвеси в пробе на рост культуры в первые несколько суток после начала эксперимента.

Выживаемость ракообразных в водных вытяжках грунтов б. Киевка, отобранных в поле *Zostera marina* у о. Второй, на песчаном пляже и у банки Хабарова составила 73%, 67% и 67% соответственно, что характеризует пробы как слаботоксичные. Средняя токсичность характерна для проб, отобранных у рифов напротив станции ВНИРО: смертность артемий превысила 50 %. Численность микроводорослей в водных вытяжках грунтов со всех станций составляла при 72-часовой экспозиции не менее 90 %, при 168-часовой экспозиции зафиксирована стимуляция роста численности. Таким образом, острое и хроническое воздействие водных вытяжек из грунтов б. Киевка на рост численности феодактилюма отсутствует. Об отсутствии токсического воздействия свидетельствует и величина Ит: ни для одной из станций не зафиксировано ингибирование или стимулирование роста численности *Ph. tricornutum* более 50 % относительно контроля.

Часть исследований выполнена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZNS-2023-0011.

Список литературы

- 1) Руководство по определению методом биотестирования токсичности вод, донных отложений, загрязняющих веществ и буровых растворов // М.: РЭФИА, НИА-Природа, 2002. 118 с.
- 2) Горбачева Е.А. Экотоксикологические исследования донных отложений центральных и восточных районов Баренцева моря // Вестник МГТУ 23(2). 2020. С. 122–130.
- 3) Христофорова Н.К., Дёгтева Ю.Е., Бердасова К.С., Емельянова А.А., Лазарюк А.Ю. Химико-экологическое состояние бухты Новик (остров Русский, залив Петра Великого, Японское море) // Известия ТИНРО 186(3). 2016. С. 135-144.
- 4) Журавель Е.В., Мазур М.А., Абдрахманова О.Т. Результаты оценки токсичности донных осадков из Дальневосточного морского заповедника на основе биотеста // Морские особо охраняемые природные территории мира. 2019. С. 23-25.
- 5) Зуенко Ю.И., Рачков В.И. Основные черты гидрологического и гидрохимического режима вод бухты Киевка (Японское море) // Известия ТИНРО 133. 2003. С. 303-312.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО МИКРОПЛАСТИКА У ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ В ВОДАХ ТИХОГО ОКЕАНА И ОХОТСКОГО МОРЯ

Поливанова Т.К.¹, Жданов И.А.², Калашникова В.М.³, Бирицкая С.А.⁴, Пахомова С.В.⁵,
Якушев Е.В.⁵

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт океанологии имени П.П. Ширинова РАН, г. Москва

³Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, г. Москва

⁴Иркутский государственный университет, г. Иркутск

⁵Норвежский институт водных исследований, г. Осло

Ключевые слова: микропластик, Охотское море, Камчатка, загрязнение, Плавающий университет, Дальний Восток.

Пластик называют «материалом 21 века», появившись в конце 1950-х он быстро приобрел популярность и стал использоваться во многих сферах промышленности и нашей повседневной жизни [1]. В процессе деградации пластик распадается на более мелкие частицы называемые микропластиком (размер менее 5 мм). Ежегодно в океан попадает от 4.8 до 12.7 млн тонн пластика. Основными источниками являются речной сток и судоходная деятельность. На сегодняшний день микропластик найден во всех объектах морской среды. Из-за отсутствия стандартных методов исследования микропластика сравнение результатов и выявление общих количественных закономерностей сильно затруднено.

Дальний восток является малоизученным с точки зрения микропластикового загрязнения. На сегодняшний день существует всего несколько работ, посвященных исследованию микропластикового загрязнения данного региона [2,3]. Охотское и Японское моря являются важным рыболовным сектором нашей страны, а также конечным этапом Северного морского пути, что приводит к активной судоходной деятельности. Поэтому оценка вклада различных источников загрязнения, пространственная изменчивость уровня загрязнения, а также связь распределения микропластика с гидрофизическими и гидрохимическими характеристиками региона является актуальной задачей для исследования.

В данной работе использованы данные по содержанию микропластика (размер 0.5 – 5 мм) в поверхностном слое (0-20 см), собранные с помощью нейстонной сети, а также данные по солености и температуре с глубины 3 м, полученные с помощью датчиков Ruro Workbench и SBE. Пробоотбор проводился в рейсе 23/4 НИС «Профессор Мультановский» в августе 2023. Для идентификации состава найденных частиц микропластика применялся ИК-Фурье спектрометр (FT-IR). В общей сложности пробы поверхностного микропластика были отобраны на 98 станциях, было собрано 2753 потенциальных частиц микропластика.

Акватория, прилегающая к юго-восточной оконечности полуострова Камчатка загрязнена микропластиком незначительно. Пробы поверхностной воды, отобранные в бухтах этой части полуострова практически не содержали частиц микропластика, включая Авачинскую бухту, на которую приходится значительная антропогенная нагрузка. На 20 % станций микропластик найден не был, концентрация изменялась в диапазоне от 0 до 0.04 штук/м³, средняя концентрация микропластика в данном районе составила 0.02 штук/м³. Похожие оценки были получены в ходе 8-й Китайской национальной арктической исследовательской экспедиции, где средняя концентрация в данном регионе составляла 0.01-0.1 штук/м³ [3]. Уровень загрязнения сопоставим с найденным нами ранее в морях Евразийской части Арктики, 0.01 штук/м³ [4].

Юго-западная часть полуострова Камчатка, со стороны Охотского моря, напротив подвержена загрязнению микропластиком в большей степени. После прохождения южной оконечности полуострова (мыс Лопатка) количество найденных частиц значительно увеличилось, не менее 30 штук

на станцию, помимо этого встречались и макро частицы полипропилена, вспененного полистирола и части рыболовных снастей. В акватории Охотского моря было отработано 46 станций, концентрация в данном регионе составила от 0.1 до 3.1 штук/м³ (средняя концентрация 0.3 штук/м³). Наибольшие концентрации наблюдались в открытой части Охотского моря (до 773 частиц микропластика на одной станции). Охотское море — это важный промысловый район с активным судоходством, которое в свою очередь является значительным источником микропластика в морской среде. Благодаря особенностям акватории (замкнутость водоема, циклоническая система течений, внутренние антициклонические круговороты) данный регион подвержен накоплению различного антропогенного мусора [5]. Данная работа является первым масштабным исследованием распределения микропластика в поверхностном слое Охотского моря.

Работа выполнена в рамках научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

Список литературы

- 1) Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде / Москва: Научный мир, 2021. 520 с.
- 2) Ершова А.А., Еремина Т.Р., Дунаев А.Л., Макеева И.Н., Татаренко Ю.А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской арктики и дальнего востока // Арктика: экология и экономика 11(2). 2021. С. 164-177.
- 3) Li Mu J., Zhang S., Qu L., Fang C., Ma X., Wang J. Microplastics abundance and characteristics in surface waters from the Northwest Pacific, the Bering Sea, and the Chukchi Sea // Marine Pollution Bulletin 143. 2019. P. 58–65.
- 4) Berezina A., Pakhomova S., Zhdanov I., Mekhova O., Polivanova T., Novikov M., Pogojeva M., Osadchiev A., Stepanova N., Yakushev E. Surface microplastics in the Kara Sea: from the Kara Gate to the 83°N // Frontiers in Marine Science 10. 2023. P. 1-11.
- 5) Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря / Москва: Мысль, 1999. 400 с.

ФАКТОРЫ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИМОРСКОЙ ЧАСТИ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Попов Г.Е.

Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Ключевые слова: Калининградская область, рациональное природопользование, хозяйство, морская экология.

Рост экономики как правило всегда влечет за собой увеличение антропогенного воздействия на экологическое состояние окружающей среды. Особенно важны для экономического развития государств приморские регионы, ориентированные в т. ч. на освоение природных ресурсов моря, в связи с чем возникает необходимость рационального использования и сохранения морской окружающей среды [1].

Для России одним из важнейших приморских регионов является Калининградская область, имеющая выход к Балтийскому морю. Калининградская область относится к регионам России с развитым промышленным производством, с 2005 года ВРП региона вырос на 825%, что выше общероссийского показателя. В структуре ВРП в 2021 году преобладали: обрабатывающие производства, торговля, транспортировка и хранение, сельское хозяйство. Калининградская область в 2022 году находилась на 8 месте по общей прибыли компаний и на 22 месте по выручке среди других регионов [2]. Цель работы: изучить основные экономические показатели районов Калининградской области, прилегающих к морю, на основании чего выявить факторы, влияющие на экологическое состояние Балтийского моря.

Калининградская область разделена на 22 административно - территориальные единицы, однако непосредственно к морю прилегают лишь 5 из них: Балтийский городской округ, Пионерский городской округ, Светлогорский городской округ, Янтарный городской округ, Зеленоградский муниципальный округ. Указанные образования составляют 15% от общей территории области. В 2020 году в них проживало 10% от всего населения региона (население области составило 1,02 млн чел.) [3].

В Балтийском г. о. единственным градообразующим фактором является база ВМФ России, крупных промышленных или сельскохозяйственных объектов на территории района образования нет. Однако негативное влияние на морскую экологию оказывает судовое топливо, но данные необходимые для оценки его воздействия отсутствуют.

Пионерский г. о. обладает высоким природно-рекреационным потенциалом. Сельскохозяйственных объектов на территории городского округа нет. Промышленность представлена пищевой отраслью – небольшими предприятиями по изготовлению рыбных и мясных продуктов. Данные производства оказывают незначительный отрицательный эффект на экологию моря, по сравнению с металлургической или химической промышленностью.

Светлогорский городской округ вошел в топ-10 самых посещаемых курортов России по данным аналитического агентства ТурСтат в 2022 году. Основу экономики округа составляют предприятия туристическо-рекреационного комплекса. На курортах округа запрещена любая деятельность, направленная на ухудшение экологического состояния территории. Однако, согласно докладу «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2022 году» в образовании более 60% сетей канализационных коллекторов требует замены, их использование негативно влияет и усиливает антропогенное влияние на морскую окружающую среду. В Янтарном г. о. основу экономики составляют предприятия по добыче и переработке янтаря, входящие в топ-60 в рейтинге предприятий области по выручке в 2022 году. Остальные отрасли промышленности представле-

ны незначительно, сельское хозяйство практически отсутствует. Основным фактором, наносящим вред морской экологии, являются неработающие очистные сооружения, расположенные в округе.

Зеленоградский муниципальный округ, обладает высоким рекреационным потенциалом, в экономике преобладает легкая и пищевая промышленность. В округе расположено несколько крупных предприятий: ООО «Восходящая звезда» (60 место по выручке в регионе в 2022 году) и АО «Автотор» (22 место по выручке). По данным доклада «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2022 году» в округе требуется замена большинства очистных сооружений [4, 5].

Можно сделать вывод, что основу экономики административно-территориальных единиц Калининградской области, прилегающих к морю, составляет (по убыванию) рекреационная отрасль хозяйства, пищевая, легкая и обрабатывающая промышленность, которые не являются самыми вредными среди всех видов промышленности. Также установлено, что большая часть очистных сооружений, обеспечивающих как промышленность, так и население в данных округах находится в неудовлетворительном состоянии, что негативно сказывается на экологическом состоянии Балтийского моря – это является главным фактором негативного воздействия на экологическое состояние Балтийского моря. Согласно Стратегии социально-экономического развития Калининградской области, в регионе планируется развитие туризма и одновременно сокращение значимости промышленности в экономике региона, особенно в образованиях, прилегающих к морю, что снизит нагрузку на очистные сооружения и будет способствовать улучшению экологической ситуации на Балтике, а также реализации конституционного права граждан на благоприятную окружающую среду [1].

-

Список литературы

- 1) Войтович Е.А. Конституционные основы права граждан на участие в управлении делами государства в Российской Федерации и Австралийском Союзе // Конституционное и муниципальное право 8. 2023. С. 53-57.
- 2) Регионы России, социально – экономические показатели [Электронный ресурс]. – URL: http://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2022.pdf (дата обращения: 06.01.2024).
- 3) Информация о социально-экономическом развитии Калининградской области в 2022 году [Электронный ресурс]. – URL: <https://gov39.ru/working/ekonomy/situation/?ysclid=lqwgs3mhaa195945884> (дата обращения: 06.01.2024).
- 4) Компании Калининградской области [Электронный ресурс]. – URL: <https://spark-interfax.ru/statistics/region/27000000000> (дата обращения: 07.01.2024).
- 5) Государственный доклад «Об экологической обстановке в Калининградской области в 2022 году» [Электронный ресурс]. – URL: https://minprirody.gov39.ru/upload/minprirody/2023/Госдоклад_об_экологической_обстановке_в_КО_за_2022_год.pdf (дата обращения: 06.01.2024).

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ МИКРОПЛАСТИКА (ОТ 100 МКМ) В ОХОТСКОМ МОРЕ В 2019 ГОДУ

Процакова В.А., Ершова А.А., Голубева Е.А.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Лаборатория ПластикЛаб (Санкт-Петербург)

Ключевые слова: микропластик, Охотское море, загрязнение океана.

В воды Мирового океана ежегодно попадает огромное количество пластикового мусора, а Тихоокеанский регион является местом формирования самого крупного мусорного пятна в мире [1]. Территория Охотского моря является зоной интенсивного судоходства, но данный район пока малоизучен в отношении загрязненности микропластиковыми частицами. В рамках экспедиции «ТРАНСАРКТИКА-2019» на научно-исследовательском судне «Профессор Мультановский» в летне-осенний период 2019 года впервые в России была проведена оценка загрязнения микропластиком морской среды на всем протяжении Северного морского пути, а также в Дальневосточных морях.

Исследование в Охотском море проводилось в его южной и юго-восточной части (а также в прилегающих водах Тихого океана и Японского моря) с июля по октябрь 2019 г. Было отобрано 8 проб морской воды с подповерхностного горизонта (4,5 м) пробоотборником-фильтром HydroPUMP (разработка лаборатории ПластикЛаб РГГМУ). Фильтровальная система содержит минимальное количество пластиковых частей, минимизирует воздушную контаминацию образца в связи с замкнутой конструкцией системы фильтрации, а съемные фильтры из нержавеющей стали имеют размер ячеек от 50 до 100 мкм. [2] Объем профильтрованной воды составлял минимум 1000 л для одной пробы. Осажденное на фильтр вещество смывалось в судовой лаборатории в стеклянную колбу и фиксировалось реактивом на основе формалина, а проба в дальнейшем доставлялась в лабораторию ПластикЛаб для последующей обработки. Лабораторный анализ состоял из нескольких этапов: удаление (растворение) органического вещества (термохимическая обработка образцов с помощью реактива Фентона (30%-ой H_2O_2 и катализатора $Fe(II)$, с дополнительной обработкой 10%-ной соляной кислотой). Осаждение полученной очищенной взвеси проводилось с помощью вакуумной установки на мембранные стекловолоконные фильтры с диаметром пор 0,7 мкм. Все этапы отбора проб, пробоподготовки и обработки образцов проводятся при тщательном соблюдении контроля воздушной контаминации (процедурные бланки, фильтрация реактивов, специальная одежда и т.п.) с последующей коррекцией результатов. Была выполнена визуальная идентификация, морфологический анализ и подсчет микропластиковых частиц с помощью светового стереомикроскопа (увеличение 40x) и тестирование частиц методом «горячей иглы» с целью подтверждения синтетического происхождения. Выборочно в дальнейшем частицы проходят полимерную идентификацию методом КРС.

Всего для получения 8 проб было профильтровано 8,93 м³ воды. В них было найдено всего 8 полимерных микрочастиц различных размеров, форм и цветов: 6 волокон (75%), 1 пленка (12,5%) и 1 фрагмент (12,5%). Таким образом, доминирующий вид микропластика в водах Охотского моря - микроволокна. Преимущественный цвет – синий (5 частиц – 62%). Также найдено по одной частице розового, зеленого и красного цвета. Среднее содержание микропластиковых частиц в подповерхностном слое – 1,2 шт/м³, при этом концентрация варьировала от 0 до 5,2 шт/м³ (в трех пробах не было найдено ни одной частицы). Размер частиц варьировал от 100 до 5700 мкм. Максимальная концентрация: 5,2 шт/м³ – отмечается в водах у южной оконечности Камчатского полуострова в районе Авачинского залива (ниже Петропавловска-Камчатского, Тихий океан). Также отмечается микропластик далее по маршруту на двух станциях в Охотском море (северная оконечность Курильских островов и юго-восточная часть Охотского моря), что вероятно связано

с активным судоходством в этой зоне. Относительно невысокая концентрации микропластика отмечена в районе Южного Сахалина - возле мыса Анива и в Татарском проливе. В этом же районе, а также в проливе Лаперуза находятся станции, где микропластик отсутствовал вовсе. Две станции с максимальными концентрациями микрочастиц (в юго-восточной части Охотского моря и у южной оконечности Камчатского полуострова) характеризовались также обилием органической взвеси (в связи с высокой продуктивностью моря в этом районе). Однако, среднее содержание частиц в этом районе не превышает концентрации микропластика в таких морях Арктики, как Лаптевых и Восточно-Сибирское, что говорит о невысокой степени загрязнения микропластиком региона Охотского моря.

Частицы типа «волокна» чаще всего являются компонентами синтетических и полусинтетических материалов, подтверждающих их антропогенное происхождение. Наиболее вероятным источником этих частиц в морских водах являются сточные воды судов. Большое разнообразие биоресурсов и внушительные нефтегазовые запасы Охотского моря делают данный район Тихого океана регионом с развитым судоходством и активной хозяйственной деятельностью, однако нельзя исключать возможное влияние на перенос микропластика тихоокеанских течений из более загрязненных областей Тихого океана.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Список литературы

- 1) Garbage Patches // Marine Debris Program [Электронный ресурс]. URL: <https://marinedebris.noaa.gov/info/patch.html> (дата обращения: 24.01.2024)
- 2) Ершова А.А., Еремина Т.Р., Дунаев А.Л., Макеева И.Н., Татаренко Ю.А. Исследование загрязнения микропластиком морей российской Арктики и Дальнего Востока // Арктика: экология и экономика. Т. 11, № 2. 2021. С. 164–177.

ДИНАМИКА СООБЩЕСТВ МАКРО- И МЕГАБЕНТОСА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

Руднева Е.В., Удалов А.А., Залота А.К., Чикина М.В.

Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: экология моря, инвазия, Карское море, Chionoecetes opilio, мегабентос, макробентос, динамика сообществ, арктические моря.

До недавнего времени Карское море представляло собой относительно стабильную экосистему, не подверженную влиянию чужеродных видов [1,2]. Однако, в начале XXI века на арктическом шельфе была выявлена инвазия краба-стригуна *Chionoecetes opilio* [3]. Данный хищник имеет широкий спектр питания, может питаться иглокожими, в частности, офиурами, моллюсками, полихетами и ракообразными [4,5].

В настоящей работе приведены результаты исследования двух размерных групп бентоса, являющихся основными пищевыми объектами краба-стригуна (макро- и мегабентос). Материал для исследования был собран в центральной части Карского моря в ходе 128 рейса НИС «Профессор Штокман» (2014 г.) и 76 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2019 г.). Для сбора донной фауны использовали трал Сигсби (мегабентос) и дночерпатель Ван Вина (макробентос). Первичную фиксацию проводили 6% нейтрализованным формалином с последующим переводом в 70% этиловый спирт.

Показано, что за период 2014-2019 г. в структуре донных сообществ центральной части Карского моря выявлены значительные преобразования, при этом абиотические параметры (придонные температура, соленость, характер грунта) на исследуемых станциях практически не изменились. Наибольшие изменения затронули мегафауну. Снизились общая численность и биомасса мегабентоса, упало обилие доминирующих видов и увеличилась выравненность видовой структуры. Для макробентоса изменения оказались не столь выражены. Вероятнее всего, наблюдаемая трансформация сообществ связана с появлением краба-стригуна *Chionoecetes opilio*, наиболее пострадали массовые виды бентоса, которые являются его основными пищевыми объектами.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 23-27-00028).

Список литературы

- 1) Карское море. Экологический атлас // М.: ООО «Арктический научный центр», 2016. 271 с.
- 2) Gerasimova A.V., Filippova N., Lisitsyna K.N., Nikishina D.V., Shunatova N., Kiyko O.A., Denisenko S.G., Maximovich N.V. Current state of macrobenthos in the southwestern Kara Sea // Continental Shelf Research. V. 224. 2021. P. 104452.
- 3) Zalota A.K., Spiridonov V. A., Vedenin A. A. Development of snow crab *Chionoecetes opilio* (Crustacea: Decapoda: Oregonidae) invasion in the Kara Sea // Polar Biology. V. 41. 2018. P. 1983–1994.
- 4) Wiczorek S.K., Hooper R.G. Relationship between diet and food availability in the snow crab *Chionoecetes opilio* (O. Fabricius) in Bonne Bay, Newfoundland // Journal of Crustacean Biology. V. 15, № 2. 1995. P. 236–247.
- 5) Burukovsky R.N., Syomin V., Zolota A., Simakov M., Spiridonov V.A. Food Spectra of Snow Crabs (*Chionoecetes opilio* (O. Fabricius, 1788)(Decapoda, Oregoniidae), Non-Indigenous Species of the Kara Sea // Oceanology. V. 61, № 6. 2021. P. 964–975.

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ МЕЛКОВОДНЫХ БУХТ ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Рюмина А.А.¹, Мазур М.А.²

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

²Национальный научный центр морской биологии имени А. В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: тяжелые металлы, донные осадки, биотестирование.

В августе 2023 г были отобраны образцы поверхностного слоя донных осадков в трех бухтах зал. Петра Великого: в бухтах Мелководной (V1) и Круглой (V2), которые располагаются в бухте Воевода и в заливе Угловом (U1). Интерес к этим бухтам вызван исследованиями вертикальных профилей содержания тяжелых металлов и органического углерода в донных осадках [1]. Бухты V1 и V2, являясь соседними бухтами, имели большие отличия в гранулометрическом составе, распределении содержания тяжелых металлов и органического углерода. Помимо этого в V2 расположена ферма марикультуры. Гидрохимические исследования U1 показали деградацию экосистемы залива [2]. Видимым проявлением этой деградации являлось исчезновение лугов морских трав, возникновение гипоксических явлений, воды залива стали источником углекислого газа для атмосферы.

Донные осадки, используемые для биотестирования, хранились в темноте при температуре 4° С не более 3 дней. С помощью стандартных методов были подготовлены водные вытяжки из донных отложений, а также произведен нерест морских ежей *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864), с последующим оплодотворением [3]. Для оценки токсического воздействия исследуемых экстрактов на личинок (спустя 18 и 48 часов от начала эксперимента) использовали расчет интегрального индекса токсичности ИТИ. Тяжелые металлы в донных осадках определяли пламенным атомно-абсорбционным методом на аппарате AA-3600 (Shimadzu, Япония).

Полученные концентрации тяжелых металлов сравнивали с фоновыми [4], а также с пороговыми уровнями токсичности SQG (TEL, PEL) [5]. Кроме того, производили расчет индивидуальных (коэффициент обогащения (*EF*), индекс потенциального экологического риска (*RI*), модифицированный коэффициент опасности (*mHQ*)) и комплексных (модифицированный индекс степени загрязнения (*mCd*) и индекс токсического риска (*TRI*)) индексов загрязнения и экологического риска.

В процессе анализа полученных концентраций тяжелых металлов в донных отложениях было отмечено превышение фоновых значений для зал. Петра Великого для Cu, Cd и Pb на всех станциях, Zn в бухте V2, Ni и Cr на станциях в бухтах V2 и U1. Превышение порогового уровня TEL отмечено в осадках бухты V2 для Cu, Cd, Pb, Zn, Ni и в осадках бухты U1 для Ni. На основе расчета коэффициента (*EF*) был выявлен серьезный для Cd и умеренно-тяжелый уровень обогащения для Cu и Pb на станции в бухте V2. Также, для донных отложений со станции в бухте V2, на основе индекса *RI*, был выявлен значительный экологический риск, свидетельствующий об интенсивном загрязнении исследуемой области. Коэффициент *mHQ* показал, что наибольший вклад в токсичность донных осадков со станции в бухте V2 для гидробионтов вносили Cu, Cd и Ni. Наибольшие значения комплексного индекса загрязнения (*mCd*) и токсичности (*TRI*) были также рассчитаны для станции в бухте V2 (умеренная степень загрязнения и низкий токсический риск).

На основе результатов расчета интегрального индекса токсичности (ИТИ) максимальное значение было получено для вытяжек из осадков со станции в бухте V2, где было выявлено наибольшее количество аномально развитых личинок на стадии гастролы (18 ч от начала эксперимента соответственно). В донных осадках в бухтах V1 и U1 значение ИТИ на стадии гастролы составило 0,64

и 2,20, в то время как на станции в бухте V2 – 9,84. Усиление токсического эффекта для осадков в бухте V1 наблюдали спустя 48 ч от начала эксперимента, значение ИТІ возросло до 7,73 баллов (среди личинок преобладали аномально развитые призмы и ранние плутеусы) и оказалось в два раза больше, чем для проб со станции U1 (ИТІ = 3,50). Подавляющее большинство личинок, развивающихся в экстрактах из донных отложений со станции в бухте V2, остановились в развитии на стадии бластулы.

Токсический эффект от воздействия вытяжек из донных отложений исследуемых акваторий может быть обоснован как высоким содержанием отдельных загрязняющих компонентов, так и совокупным действием нескольких поллютантов. Наибольшее количество аномально развитых личинок в нашем исследовании было отмечено в экстрактах из станции в бухте V2 и именно в осадках из данной акватории были зафиксированы превышения фоновых концентраций Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd, а также превышение порогового уровня TEL для Zn, Cu, Ni, Pb, Cd. Помимо этого, коэффициенты *EF*, *RI*, *mHQ*, *mCd* и *TRI* показали наибольшие значения по своим параметрам для бухты V2. В донных осадках бухты V1 были зафиксированы превышения фоновых концентраций Cu, Pb, Cd, а в донных осадках бухты U1 – Cu, Ni, Cr, Pb, Cd. Усиление токсического эффекта для осадков в бухте V1 наблюдали спустя 48 ч от начала эксперимента, значение ИТІ возросло с 0,64 до 7,73, в то время как для проб со станции U1 значение ИТІ увеличилось с 2,20 до 3,50.

Работа выполнена в рамках госбюджета, тема № 124022100077-0.

Список литературы

- 1) Рюмина А.А., Тищенко П.Я., Шкирникова Е.М. Тяжелые металлы и органический углерод в донных осадках мелководных бухт залива Петра Великого // Геохимия 68 (7). 2023. С. 709-719.
- 2) Тищенко П.Я., Барабанщиков Ю.А., Павлова Г.Ю., Рюмина А.А., Сагалаев С.Г., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Уланова О.А., Швецова М.Г., Шкирникова Е.М., Тибенко Е.Ю. Гидрохимическое состояние залива Угловой (Амурский залив) в разные сезоны // Известия ТИНРО 201(1). 2021. С.138-157.
- 3) Beiras R., Fernandez N., Bellas J., Besada V., Gonzalez-Quijano A., Nunes T. Integrative assessment of marine pollution in Galician estuaries using sediment chemistry, mussel bioaccumulation, and embryo-larval toxicity bioassays // Chemosphere 52 (2). 2003. P. 1209–1224.
- 4) Ковековдова Л.Т., Симоконь М.В. Тенденции изменения химико-экологической ситуации в прибрежных акваториях Приморья. Токсичные элементы в донных отложениях и гидробионтах // Известия ТИНРО 137. 2004. С. 310-320.
- 5) MacDonald D.D., Carr R.S., Eckenrod D., Greening H., Grabe S., Ingersoll C., Janicki S., Janicki T., Lindskoog R.A., Long E.R., Pribble R., Sloane G., Smorong D.E. Development, evaluation, and application of sediment quality targets for assessing and managing contaminated sediments in Tampa Bay, Florida // Archives of Environmental Contamination and Toxicology 46. 2004. P. 147–161.

ПТЕНЦЫ ПИНГВИНОВ ГУМБОЛЬДТА (*SPHENISCUS HUMBOLDTI*) В ПРИМОРСКОМ ОКЕАНАРИУМЕ: ОТ ВЫЛУПЛЕНИЯ И ДО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ ЖИЗНИ В СТАЕ

Сабуцкая М.А.

Научно-образовательный комплекс «Приморский океанариум» – филиал Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: *Spheniscus humboldti*, пингвин Гумбольдта, разведение пингвинов в искусственных условиях, раскорм птенцов пингвинов Гумбольдта.

Пингвины Гумбольдта (*Spheniscus humboldti*) – нелетающие птицы среднего размера с длиной тела 67-72 см и массой тела 4,2-5 кг, гнездящиеся на Тихоокеанском побережье в районе холодного течения Гумбольдта. Описано не менее 60 колоний пингвинов этого вида - 41 в Перу и 19 в Чили. В виду многих факторов, данные по общей численности популяции пингвинов Гумбольдта значительно разнятся и варьируются от 30 000 до 48 000 гнездящихся птиц [1,2].

Вид классифицируется как уязвимый из-за резких колебаний размера популяции, кластерного распределения и основных угроз для вида, которые не улучшаются с течением времени и занесен в Международную Красную Книгу [3].

Согласно международному правительственному соглашению, подписанному в результате резолюции Международного союза охраны природы в 1973 году в Вашингтоне вид внесен в Конвенцию о международной торговле видами, находящимися под угрозой исчезновения СИТЕС (англ. CITES - Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora) [4,5].

Разведение в условиях зоопарков и океанариумов видов животных и птиц, находящихся под угрозой исчезновения в дикой природе, является актуальным и приоритетным направлением. Обмен опытом размножения тех или иных уязвимых и исчезающих видов поможет поддерживать здоровые и генетически разнообразные популяции животных, содержащихся в неволе.

На сегодняшний день популяция пингвинов Гумбольдта, содержащаяся в Приморском океанариуме, является одной из крупнейших. На данный момент в экспозиции Приморского океанариума сформировались 9 постоянных, размножающихся пар пингвинов. С 2020 по 2023 год сотрудниками отдела орнитологии, зарегистрировано вылупление 29 птенцов.

Кормление пингвинов и их птенцов в условиях искусственного содержания имеет свои особенности. Известно, что все представители отряда пингвинообразных питаются рыбой, которую они ловят самостоятельно, либо вместе со своей стаей. В условиях океанариумов и зоопарков пингвинов кормят мелкой свежеразмороженной рыбой, то есть каждый пингвин должен уметь принимать цельную рыбу из рук специалиста. Соответственно, каждого вылупившегося птенца в условиях искусственного содержания необходимо научить питаться рыбой из рук человека (раскормить) [1].

Целью сотрудников отдела орнитологии, занимающихся содержанием пингвинов Гумбольдта в Приморском океанариуме была выработка оптимальной схемы раскорма. Необходимо было выявить в каком возрасте нужно отселять птенцов отдельно от родителей и в каком режиме кормить, чтобы птицы максимально быстро и с минимальным стрессовым воздействием научились принимать рыбу из рук человека.

Известно, что пингвины Гумбольдта способны размножаться в течение всего года, с пиками весной и осенью – так и было в пингвинирии Приморского океанариума. Была проанализирована длительность и качество разработанных схем на 5 группах птенцов. Каждая группа содержала от 4 до 8 птенцов пингвинов, вылупившихся в одном временном диапазоне.

Для предотвращения кормления родителями, птенцы были изолированы в соседнее с основным вольером помещение. Завершенным раскормом считалась способность птенца полностью самостоятельно брать цельную рыбу из рук специалиста.

Известно, что на начальных этапах раскорма птенцы пингвинов должны получать ежедневно количество рыбы эквивалентное 10% их веса. В ходе приучения птенцы получали именно столько цельной, свежеразмороженной рыбы [1,2].

В результате наблюдений выявлено, что на эффективность и скорость раскорма значительно влияет возраст, в котором птенцов пингвинов изолируют от родителей. Так, группа, средний возраст птенцов в которой был 5-6 месяцев, самостоятельно научилась принимать рыбу из рук человека, в среднем, только спустя 20 суток. В то время как группа, в которой был начат раскорм при среднем возрасте птенцов 2-3 месяца, птенцы начали самостоятельно принимать рыбу у специалиста в среднем спустя 14 суток.

В ходе наших наблюдений описано 2 случая, при котором раскорм осуществлялся без изолирования от родителей и проходил также достаточно быстро – приблизительно за 12-14 суток. Необходимо отметить, что возможность для такого формата раскорма доступна редко, зато такая схема характеризуется минимальным стрессовым воздействием на молодую птицу.

Работа частично выполнена на базе ЦКП "Приморский океанариум".

Список литературы

- 1) Schneider T., Olsen D., et al. AZA Penguin Taxon Advisory Group. (2014). Penguin (Spheniscidae) Care Manual. Silver Spring, MD: Association of Zoos and Aquariums
- 2) Beall F., Branch S. Housing and Enclosure Requirements. Penguin Husbandry Manual (3rd ed.) // American Zoo and Aquarium Association, 2005. 142 p.
- 3) Boersma P.D. Penguins as marine sentinels // Bioscience. V. 58, № 7. 2008. P. 597–607.
- 4) Scholten C.J. Breeding biology of the Humboldt penguin *Spheniscus humboldti* at Emmen Zoo // International Zoo Yearbook. V. 26, № 1. 1987. P. 198–204.
- 5) Garcia-Borboroglu P.G., Boersma P.D. Humboldt Penguin *Spheniscus humboldti* in Species Fact Sheets //2012. – (GlobalPenguinSociety.org).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА В ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ (НА ПРИМЕРЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ)

Сукманова Т.В.

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Ключевые слова: Цифровой двойник, прибрежные территории, digital twin, природопользование

Термин «Цифровой двойник» (ЦД, digital twin) в настоящий момент широко используется в различных сферах (инженерия, производство, строительство, медицина и др). Данное явление получило наибольший интерес и, соответственно, развитие в 2018-19-х годах [1], но сама по себе концепция «цифрового двойника» была представлена в 2000-х годах Michael Grieves из Мичиганского университета [2]. Исходя из развития данной концепции в инженерном деле, цифровой двойник – это виртуальный прототип физического объекта, группы изделий или процесса, осуществляющий сбор и повторное использование цифровой информации об объекте [3]. Также стоит отметить, что происходит постоянный обмен данными между физическим объектом и его виртуальной копией с соответствующей скоростью синхронизации [4], т.е этот процесс является непрерывным. т.е этот процесс является непрерывным. Цифровой двойник разрабатывается и применяется на всех стадиях жизненного цикла изделия [5].

Структура ЦД включает в себя основные компоненты: геометрическую, информационную и функциональную модель. Помимо этих элементов, цифровой двойник также может включать в себя данные о процессах эксплуатации, обслуживания и управления зданием/сооружением/ заводом/городом или другим объектом. Данная структура применима ко всем ЦД подобного вида, но если мы говорим о ЦД в природопользовании, то в определение и структуру необходимо внести определенные особенности и специфические параметры.

Определение ЦД в природопользовании должно отражать особенности природной, антропогенной и природноантропогенных сред. Цифровой двойник, с точки зрения природопользования представляет собой виртуальную копию реальной экосистемы или природного объекта, которая создается исходя из собранных данных и моделей. На основе полученных данных можно производить расчеты в виде сценариев развития территории с помощью инструментов манипулирования/моделирования. Главной особенностью данного метода является «сохранность» реального объекта, т.е эксперименты для улучшения ситуации проводятся в виртуальной среде и исходя из полученных результатов можно выбрать оптимальный сценарий развития территории или объекта. Данный ЦД должен в себя включать следующие структурные особенности: базы данных об объекте, геоинформационные системы, 3D модель объекта, визуализация, интеграция, управление.

Метод ЦД может быть использован для изучения прибрежных территорий, анализируя взаимодействие биотических и абиотических факторов, воздействие климатических изменений, и реакцию среды на антропогенные воздействия. В природопользовании этот метод может помочь в грамотном управлении прибрежной территории и морской среды, уменьшая спорные ситуации при пространственном планировании и помогая в расчете берегоукрепительных работ и создании различных сценариев эксплуатации объекта.

Для примера интеграции ЦД в природопользовании был использован участок на Балтийской косе (1км, территория п. Коса), который испытывает природные и антропогенные влияния. Исходными данными для построения 3D модели послужили снимки с БПЛА (DJI Phantom 4 pro), снятые 4 февраля 2022 года после серии штормов. Это способствовало для определения начальной

точки создания сценариев манипуляции над двойником. По итогу проделанной работы были созданы 3 отдельных прототипа ЦД с учетом вариабельности развития территории. Один из сценариев прототипа осуществился в декабре-феврале 2024 г. после серии штормов. По данным Балтберегозащиты было повреждено 6-10% от общей длины бигбэгов (425 м), восстановление и увеличение берегоукрепительных сооружений продолжают в 2024г.

Перед исследователями и разработчиками в создании ЦД стоит множество определенных задач: корректность полученных данных, точность 3D-моделирования, скорость и точность связи между реальной и виртуальной средой, степень удобства для пользователя, качество автоматизированного принятия решений и т.д. Изучая и модернизируя эти характеристики, мы можем оценить экологический след производственной системы, чтобы поддержать ее усилия по обеспечению устойчивости окружающей среды и для улучшения экологической ситуации в целом.

-

Список литературы

- 1) Jones D., Snider C., Nassehi A., Yon J., Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 29. 2020. P. 36-52.
- 2) Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication; A White Paper; Michael Grieves, LLC: Melbourne, FL, USA. – 2014
- 3) Эксперты Ассоциации «Технет» приняли участие в подготовке доклада РАНХиГС «Государство как платформа: люди и технологии» [Электронный ресурс] / Инфраструктурный центр «Технет» СПбПУ. – Режим доступа: <https://technet-nti.ru/news/6852>
- 4) ISO 23247-3-2021 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 3: Digital representation of manufacturing elements
- 5) ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения»

ОЦЕНКА УГЛЕВОДОРОДНОГО СОСТАВА ВОДЫ УРОЧИЩА БАТИЛИМАН (ЮЖНЫЙ БЕРЕГ КРЫМА) В ПЕРИОДЫ РАЗЛИЧНОЙ РЕКРЕАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ

Ткаченко Ю.С., Тихонова Е.А., Соловьева О.В.

ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН, Севастополь, Российская Федерация

Ключевые слова: углеводороды, прибрежная акватория, рекреационная нагрузка, морская вода, диагностические индексы, урочище Батилиман.

Береговая линия урочища Батилиман (прибрежно-аквальный комплекс между мысом Сарыч и бухтой Ласпи), с которого начинаются горы Южного берега Крыма, тянется от основания горы Куш-Кая до бухты Ласпи. Акватория участка характеризуется интенсивным водообменом с открытым морем и высокой аэрацией. За последние десятилетия исследуемый участок, ранее относившийся к категории эталонно чистых, испытывает существенное антропогенное воздействие [1]. Возможно, это связано с активной застройкой прибрежной зоны данного участка. Ранее практически не исследовалось внутригодовое и межгодовое качество морской воды урочища Батилиман.

Целью данной работы является оценка состояния морской среды урочища Батилиман по содержанию углеводородов (УВ) в соответствии с их сезонной динамикой.

В задачи исследования входило — определение качественного и количественного состава углеводородов воды прибрежной акватории с оценкой её качества по данному показателю и сезонных изменений в составе углеводородов.

Пробы воды на анализ УВ отбирали в мае, июле и октябре 2023 г. на двух станциях. Первая — «Биостанция», относительно неэксплуатируемый участок, с низкой антропогенной нагрузкой. Вторая станция — пляж «Таврида», район с высокой антропогенной нагрузкой в летний период. Определение качественного и количественного состава УВ производилось на базе НОЦКП «Спектрометрия и хроматография» ФИЦ ИнБЮМ методом газовой хроматографии на хроматографе «Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Для обработки результатов использовали программное обеспечение «Хроматэк Аналитик 3.0», метод абсолютной калибровки и процентной нормализации.

Для идентификации генезиса УВ использованы следующие диагностические индексы: TAR , ACL , LWH/HWH , Paq , CPI_1 и CPI_2 [2, 3].

Концентрация углеводородов в исследуемый период в прибрежных водах урочища Батилиман составляла 0,013–0,304 мг/л. В июле на ст. 1 было зафиксировано превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) для рыбохозяйственных водоёмов (0,05 мг/л) в 6 раз. В остальные периоды превышения ПДК зафиксировано не было. Тем не менее анализ хроматограмм и значения рассчитанных диагностических индексов показали, что превышение санитарных нормативов, отмеченное в июле на одной из станций, носит природный характер и связано с активным поступлением аллохтонных соединений.

По результатам исследования проб воды в акватории урочища Батилиман, отобранных в период с мая по октябрь 2023 г., и, в том числе, в пик рекреационного сезона, установить наличие нефтяного загрязнения вод бухты не удалось. Основными источниками формирования углеводородного фона акватории в мае были автохтонные процессы, связанные с продукцией фитопланктона и бактериальной деструкцией органических веществ, т. к. на хроматограммах доминировали низкомолекулярные гомологи, в частности гептадекан ($n-C_{17}$), который является основным алканом фито- и зоопланктона и алкан $n-C_{19}$ — также фитопланктонного генезиса [4]. В последующие периоды значимость фитопланктонной продукции снижалась, и на первый план выходили бак-

териальные процессы и поступление аллохтонных соединений, о чем свидетельствуют пики n-алканов, доминирующие в высокомолекулярной области спектра.

Ввиду увеличивающейся антропогенной нагрузки на этот участок побережья, связанной со строительством туристических объектов, полученные результаты фоновых исследований могут быть использованы в дальнейшем для сравнительного анализа состояния вод урочища Батилиман при экологическом мониторинге или экологической оценке при чрезвычайных ситуациях.

Работа выполнена в рамках темы гос. задания ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН (ФИЦ ИнБИОМ) «Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемозокологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России» (№ гос. регистрации: 1023032000047-8-1.6.19).

Список литературы

- 1) Тихонова Е.А., Соловьева О.В., Миронов О.А., Бурдиян Н.В. Санитарно-биологическая характеристика прибрежной акватории ландшафтного заказника «Ласпи» (Черное море) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 3. 2020. С. 95–106.
- 2) Zhang S., Li S., Dong H., Zhao Q., Lu X., Shi J. An analysis of organic matter sources for surface sediments in the central South Yellow Sea, China: evidence based on macroelements and n-alkanes // Marine Pollution Bulletin 88(1-2). 2014. P. 389–397.
- 3) Shikui Z. The distribution and environmental significance of n-alkanes in the Changjiang River estuary sediments // Environmental Science 28(6). 2008. P. 1221–1226.
- 4) Немировская И.А. Нефть в океане (загрязнение и природные потоки) // М.: Научный мир, 2013. 432 с.

ОЦЕНКА МАССЫ АНТРОПОГЕННОГО МОРСКОГО МУСОРА В ПОСЛЕШТОРМОВЫХ БРОСАХ

Фетисов С.В., Есюкова Е.Е., Лобчук О.И., Чубаренко И.П.

Институт океанологии им. П.П. Ширинова Российской академии наук, г. Москва

Ключевые слова: морской мусор, пластик, Балтийское море, мониторинг загрязнения.

Проблема загрязнения пляжей антропогенным мусором актуальна практически для всех прибрежных территорий и особенно актуальна для песчаных пляжей с высоким уровнем рекреационной активности. В рамках береговых экспедиций 2019-2023 годов вдоль побережья Калининградской области были проведены отборы проб в нескольких зонах пляжа и послештормовых бросках. Цель данной работы – определить количественный и качественный состав антропогенного морского мусора на песчаных пляжах юго-восточной части Балтийского моря.

По оценкам модельных данных более 70% морского мусора скапливается в прибрежной зоне, где сложный комплекс физических процессов (течения различной природы, ветровое воздействие, транспорт наносов и т.д.) влияет на поведение, деградацию, транспорт антропогенного морского мусора, в том числе на эпизодические выносы его на берег [1]. Послештормовые бросы – массовые выбросы на пляж объектов как естественного, так и антропогенного происхождения в послештормовой период (различные виды водорослей, янтарь, ветки и щепки, трава и листья, перья, останки морских животных и рыб и т.д.). В выброшенном на берег материале отмечается значительное количество морского мусора различной природы. Визуально выделяются разноцветные микрочастицы (<5 мм), мезочастицы (>5 мм), макрочастицы (>25 мм) (окурки и фильтры от сигарет, частицы вспененного пенополистирола, фрагменты одноразовой посуды, синтетических волокон от пластиковых мешков). Также были обнаружены мегаобъекты (>1 м) (клубки спутанной лески и рыболовных сетей, объемная упаковочная тара, мешки, фрагменты канатов, тросов и строп, фрагменты больших пластиковых контейнеров, строительного мусора и т.д.) [2].

Для оценки степени загрязнения поверхности пляжа и послештормовых бросов антропогенным морским мусором использовался отбор проб методом рамок с модификациями и метод ОСПАР [2]. Классический метод рамок предполагает отбор проб на поверхности пляжа рамками 0.25 м² или 1 м² [3]. В данной работе, в качестве модификации, были добавлены дополнительные отборы проб на участке 10 м² с поверхности броска и рядом с ним. Это позволило более точно оценить загрязнение послештормовых бросов. Метод ОСПАР является регулярным мониторингом, который проводится 4 раза в год на одних и тех же пляжах в спокойную погоду. Поэтому результаты, полученные данным методом, удобно использовать в качестве фонового загрязнения.

Всего было произведено 19 отборов проб методом рамок на послештормовых бросках (п. Отрадное, Филинская бухта, район игровой зоны «Янтарная», Балтийская коса) и 19 мониторингов по методу ОСПАР на 5 различных пляжах (Балтийская коса, г. Балтийск, п. Янтарный, г. Зеленоградск и п. Морское на Куршской косе). По методу рамок на послештормовых бросках с поверхности 10 м² отбирался и подсчитывался весь визуально идентифицируемый мусор, а с площади рамок 0.25 м² отбирался весь материал из толщи броска (от поверхности до песка). Дополнительно оценивалось количество мусора на свободной от броска площади непосредственно рядом с ним. По методу ОСПАР весь визуально идентифицируемый мусор собирался со всей площади пляжа (ширина участка от клифа/дюны до уреза моря) на расстоянии 100 м вдоль уреза. Весь отобранный мусор подсчитывался, высушивался и взвешивался в лабораторных условиях. Таким образом были получены количественные значения загрязнения мусором единицы площади в г/м² и шт./м².

С помощью метода ОСПАР были получены значения загрязнения антропогенным мусором поверхности пляжа 0.20-0.44 г/м² (0.09-0.24 шт./м²). В материале послештормового броска по методу рамок были получены более высокие значения: на поверхности броска 2-116 г/м² (1.1-100 шт./м²);

на свободной поверхности пляжа рядом с бросом 0-8.6 г/м² (0-1.5 шт/м²). Необходимо отметить, что значительный разброс величины загрязнения в материале бросов обусловлен влиянием многих факторов: типа броса (мощный и однородный или тонкий и размытый), типа преобладающих водорослей (*Furcellaria lumbricalis*, *Polysiphonia fucoides*, *Cladophora rupestris*, *Cladophora glomerata*), сезона и т.д.

В результате были получены средние оценки массы и количества антропогенного морского мусора в материалах бросов в послештормовой период. Исходя из этого можно сделать выводы: (i) выброшенный на берег материал с большим количеством органических составляющих содержит значительно большее (на несколько порядков) количество и массу антропогенного мусора, чем зоны пляжа, свободные от штормовых выбросов; (ii) пластиковый мусор, обычно составляющий более 85% антропогенного мусора [4], концентрируется в местах обширных бросов: выбрасывается и смывается обратно в море совместно с природным органическим морским мусором.

Работа выполнена в рамках государственного задания АО ИО РАН № FMWE-2024-0025.

Список литературы

- 1) Onink V., Jongedijk C.E., Hoffman M.J., Van Sebille E., Laufkötter C. Global simulations of marine plastic transport show plastic trapping in coastal zones. *Environ. Res. Lett.* 16. 2016. 064053.
- 2) Чубаренко И.П., Есюкова Е.Е., Хатмуллина Л.И., Лобчук О.И., Исаченко И.А., Буканова Т.В. Микропластик в морской среде // М.: Научный Мир. 2021. 520 с.
- 3) Haseler M., Schernewski G., Balciunas A., Sabaliauskaite V. Monitoring methods for large micro- and meso-litter and applications at Baltic beaches // *J. Coast Conserv.* 22. 2018. P. 27–50.
- 4) UNEP, 2021. Comprehensive assessment on marine litter and plastic pollution confirms need for urgent global action. United Nations environmental Programme. <https://www.unep.org>

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСТРИЧНОЙ ФЕРМЫ НА ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ В ЗАЛИВЕ ДОНУЗЛАВ

Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь

Ключевые слова: европейская устрица, залив Донузлав, марикультура, прибрежные экосистемы

Развитие аквакультуры определяется сочетанием экологических, биологических и экономических факторов. Для устойчивого развития аквакультуры необходимо обладать прогнозом возможных негативных сценариев развития морского хозяйства. На сегодняшний день имитационное моделирование является единственным инструментом для анализа процессов взаимодействия объектов аквакультуры и морской среды и прогноза возможных изменений при ведении хозяйственной деятельности.

Оценка влияния устричной фермы на гидрохимические характеристики воды в заливе Донузлав проводилась при помощи разработанной ранее двумерной химико-биологической объектно-ориентированной модели (ООМ) морского хозяйства [1]. Для этого, в указанную модель был добавлен новый вид объектов, имитирующий физиологические процессы плоских устриц. Основным методом нового вида является одномерная модель динамического баланса энергии европейской устрицы [2]. Модель была верифицирована по значениям линейного и весового роста устриц, полученным при проведении натурального эксперимента в заливе Донузлав в 2001–2003 гг.

Наличие действующих морских хозяйств и натуральных данных о динамике морфометрических характеристик плоской устрицы в заливе Донузлав [3, 4], обусловило выбор данного района в качестве модельной плантации. Расположение устричных садков и их наполнение имитировали представленную в работе [5] схему расположения устричной фермы. Площадь модельной фермы составляет 23 га. Основной структурной единицей фермы является плот, способный удерживать массу до 400 кг, на который подвешены садки с устрицами. Модельная ферма состоит из 128 плотов, что обеспечивает мощность морского хозяйства 51,2 т товарной продукции или 2.2 т/га.

В начальный момент интегрирования задавались средний сухой вес мягких тканей отдельной устрицы и суммарный сухой вес мягких тканей на одном плоту, вертикальный профиль температуры воды, поля соединений химических элементов: нитратов, нитритов, аммония, фосфатов, взвешенного и растворенного органического вещества. Эти поля формировались как случайные с заданным средним и дисперсией, средние значения соответствовали средним по центральному району Донузлава [3]. Фитопланктон моделировался как поле, представленное множеством объектов нескольких видов микроводорослей. Направление среднего течения было принято параллельно блокам фермы, скорость течения составляла 2 см/с. Для биологических объектов модели шаг по времени составлял 3 часа, для гидрохимических и гидродинамических 0.6 часа. Интегрирование проводилось на период 5 месяцев с мая по октябрь.

Целью численных экспериментов было получение количественной оценки воздействия устричной фермы на морскую среду. Для этого проводилось вычисление средних энергетических характеристик культивируемых на ферме устриц в разные сезоны, а также потоков вещества между фермой и окружающей средой. Расчёты проводились отдельно для разных размерных групп устриц: 6-7 г, 65 г и 130 г (сырого веса с раковиной). Вычислялись средние по ферме фильтрация, рацион, затраты на метаболизм, выделение, масса экскретируемых аммония и фосфатов, изменения полей гидрохимических показателей. Сравнение полученных результатов проводилось с расчетами, полученными для тех же условий, но с «выключенной» морской фермой.

Несмотря на возросшую нагрузку на акваторию из-за наличия устричной фермы, в первый год культивирования устриц повышенные значения аммония фиксируются только в районе расположения коллекторов и за фермой по течению. В целом возрастания концентрации аммония не происходит, так как он быстро поглощается фитопланктоном, потребляемым затем моллюсками. Результаты моделирования показывают увеличение концентрации фосфатов. Также содержание в воде нитратов и растворённого органического вещества выходит на новый более высокий уровень по сравнению с начальным состоянием системы. На второй год культивирования влияние фермы на экосистему увеличивается. Об этом свидетельствуют увеличение концентрации фосфатов, нитратов и органического вещества в системе, двукратное увеличение объема биоотложений.

Предложенная модель показывает результаты, сопоставимые с модельными данными, полученными в одномерной модели [2] и натурными данными, полученными в процессе культивирования плоской устрицы в зал. Донузлав [4]. Описать влияние плантации устриц на экосистему можно следующим образом: устричная ферма включается в цикл азота и фосфора экосистемы, потребляя кормовую взвесь и выделяя детрит, аммоний и фосфаты. Отклик прибрежной экосистемы на включение устричной фермы заключается в росте концентрации органического вещества, нитратов и фосфатов. Эти изменения зависят от возраста устриц и объемов культивирования. Анализ результатов моделирования показал, что для устойчивого роста устриц необходимо сбалансированное расположение на коллекторах фермы устриц разного возраста и веса.

Государственное задание FNNN-2024-0016 «Исследование пространственно-временной изменчивости океанологических процессов в береговой, прибрежной и шельфовой зонах Черного моря под воздействием природных и антропогенных факторов на основе контактных измерений и математического моделирования».

Список литературы

- 1) Vasechkina E.F. Coupled physical biological model of shellfish mariculture // Proceedings of the Thirteen International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST. 2017. P. 381 – 392.
- 2) Филиппова Т.А., Васечкина Е.Ф. Имитационная модель роста устрицы *Ostrea edulis* L. в условиях культивирования // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 4. 2023. P. 87–100.
- 3) Дьякова Н.Н., Фомина В.В. Современные гидрометеорологический и гидрохимический режимы залива Донузлав // Севастополь: Росгидромет, 2021. 464 с.
- 4) Сытник Н.А. Функциональная экология плоской устрицы (*Ostrea edulis* L., 1758, *Ostereidae*, *Bivalvia*) Чёрного моря // Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. биол. наук. Севастополь, 2015. 23 с.
- 5) Крючков В.Г. Устричное хозяйство. Пояснительная записка и экономические расчеты // Керчь, 2014. 92 с.

СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА О.ВРАНГЕЛЯ

Чекменева Н.А.¹, Погожева М.П.^{1,2}, Долгова А.О.¹

¹Государственный океанологический институт им. Н.Н. Зубова, г. Москва

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Арктика, загрязнение, о.Врангеля, тяжелые металлы, металлоиды, лед, снег, поверхностные воды.

Изучено содержание тяжелых металлов (ТМ) в арктических грунтах, а также в поверхностных водах суши о.Врангеля и морских водах вблизи береговой линии о.Врангеля, расположенного между Восточно-Сибирским и Чукотским морем, в рамках комплексной арктической экспедиции в августе и сентябре 2022 года. Территория о.Врангеля уникальна, здесь расположен одноименный Федеральный государственный природный заповедник «Остров Врангеля», созданный в 1976 г. С 2004 г. данная территория включена в список Всемирного природного наследия ЮНЕСКО, остров является самым северным среди всех объектов Всемирного природного наследия. На острове широко представлены реликтовые растительные сообщества, которые господствовали на севере Берингийской суши в плейстоцене. Местами эти сообщества имеют ландшафтообразующее значение, тем самым делая ландшафты острова наиболее близкими к древним плейстоценовым, из всех существующих на планете в настоящее время [1]. Естественные экосистемы Арктики являются чрезвычайно уязвимыми к действию загрязняющих веществ в силу низкого уровня интенсивности масс- и энергообменов, замедленных процессов самоочищения, коротких пищевых цепей, способствующих быстрому перемещению токсикантов к конечным потребителям [2]. Исследование загрязнения Арктических природных сред тяжелыми металлами, становится в последнее время все более актуальным в связи с увеличивающимися рисками как локального, так и удаленного характера из-за расширения хозяйственной деятельности в Арктике.

Исследования были проведены в два этапа. Во время первого этапа полевых работ было отобрано 60 проб: из них 14 проб речной воды, 6 проб морской воды, 4 пробы снега, 26 проб грунта, 10 проб биоты (образцов печени, шерсти и перьев павших животных и птиц) для дальнейшего анализа на содержание тяжелых. Параллельно, инспекторами заповедника проводился ежегодный «круговой» маршрут вокруг всего острова – второй этап полевых работ, в ходе которого они также проводили отбор проб тех же компонентов природной среды следуя заданной методике. Всего, по итогам двух этапов полевых работ в различных частях острова было отобрано 147 проб. Таким образом, во время экспедиции 2022 г. удалось набрать большой материал и впервые получить результаты загрязнения различных компонентов природной среды этого района.

Концентрация тяжелых металлов была оценена в 28 пробах грунта - на содержание 12 ТМ (хром, марганец, кобальт, никель, медь, цинк, сурьма, ртуть, свинец, ванадий, мышьяк, кадмий), 29 пробах речной воды, 12 пробах морской воды, 4 пробах снега – 31 ТМ (бериллий, бор, магний, алюминий, титан, хром, марганец, железо, кобальт, никель, медь, цинк, стронций, молибден, серебро, сурьма, теллур, барий, вольфрам, ртуть, таллий, свинец, висмут, ванадий, мышьяк), 8 пробах печени животных и птиц, 4 пробах перьев птиц, 19 пробах шерсти и 3 пробах жира белого медведя – 27 ТМ (бериллий, бор, алюминий, титан, хром, марганец, кобальт, никель, медь, цинк, стронций, молибден, серебро, олово, сурьма, теллур, барий, вольфрам, ртуть, таллий, свинец, висмут, ванадий, мышьяк, кадмий). Химический анализ проб был выполнен в лаборатории химико-аналитического контроля федерального государственного бюджетного учреждения «27 Научный центр» Министерства обороны Российской Федерации в октябре-декабре 2022 г. Для всех тяжелых металлов, проанализированных в компонентах абиотической природной среды, приведены

показатели, характеризующие предельные концентрации основных неорганических веществ, в соответствии с перечнем СанПиН 1-2-3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания» [4]. Для ТМ, проанализированных в пробах воды, как для поверхностных вод суши, так и для морских вод, а также в пробах снега по каждому типу показателей приведены данные Всемирной Организации Здравоохранения, Агентства по охране окружающей среды (Environment Protection Agency – USEPA), Европейского Сообщества и Госкомсанэпиднадзора России по российским единицам измерений.

В докладе представлены результаты содержания и распределения ТМ и металлоидов в перечисленных природных средах уникальной территории острова Врангеля, проведено сравнение полученных результатов с данными литературных источников, а также исследований прошлых лет, приведены картосхемы содержания ТМ, предпринята попытка оценки состояния окружающей среды острова с точки зрения содержания наиболее опасных металлов.

Исследование поддержано 27 Научным центром Министерства обороны Российской Федерации и Русским географическим обществом.

Список литературы

- 1) <http://www.ostrovwrangelya.org/index.php> - официальный сайт ФГБУ «Государственный заповедник «Остров Врангеля»
- 2) Моргунов Б.А. Диагностический анализ состояния окружающей среды Арктической зоны Российской Федерации (Расширенное резюме) // М.: Научный мир, 2011. 200 с.
- 3) Алтынов А.И. Национальный атлас Арктики // М.: АО «Роскартография», 2017. 496 с.
- 4) СанПиН 1-2-3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и(или) безвредности для человека факторов среды обитания»
- 5) Косько М.К., Авдюничев В.В., Ганелин В.Г., Опекунов А.Ю., Опекунова М.Г., Сесил М.П., Смирнов А.Н., Ушаков В.И., Хандожко Н.В., Харрисон Дж.К., Шульга Ю.Д. Остров Врангеля: геологическое строение, минерагения, геоэкология // Труды НИИГА-ВНИИОкеангеология. Т. 200. 2003. 137 с.

ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ ГРУНТОВ РЕК ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПРИМОРЬЯ И КАМЧАТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *SCENEDESMUS QUADRICAUDA*

Шестёра А.А., Пелех А.Д., Пичуева А.С.

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: Приморье, Камчатка, биотестирование, донные отложения, *Scenedesmus quadricauda*, токсичные вещества, органические вещества.

При мониторинге экологического состояния морских прибрежных зон необходимо учитывать влияние на него веществ, поступающих с речным стоком, так как водотоки – один из основных источников поступления поллютантов в морские акватории. На экологическое состояние рек существенно влияет характер и интенсивность антропогенного воздействия на ландшафт. С целью изучения этой зависимости была проведена сравнительная оценка токсичности грунтов рек южной части полуострова Камчатка и полуострова Муравьев-Амурский методом биотестирования.

Под данным методом понимают процедуру установления токсичности среды с помощью живых организмов (тест-объектов). Токсичность среды – это её интегральная характеристика, обусловленная проявлением негативных для биоты свойств химических веществ, присутствующих в испытываемой среде и проявляющих синергетическое, антагонистическое и аддитивное действие.

Таким образом, биотестирование, в отличие от физико-химических методов, не позволяет напрямую выявить перечень и концентрацию загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды, однако по состоянию тест-объектов можно предсказать возможные изменения в экосистемах на данном уровне загрязнения. Кроме того, для ряда компонентов окружающей среды (например, для почв и донных отложений) нормативы установлены для узкого перечня загрязняющих веществ, что затрудняет их адекватную экологическую оценку.

Донные отложения отбирались на Камчатке в сентябре 2022 г. на 18 станциях, находящихся на реках Паратунка, Мутнушка, Авача, Халактырка, Кирпичная, Плотникова, Камчатка, Андриановка, ручье Козельский, озере Халактырское и в Приморье в апреле 2023 г. на 12 станциях, расположенных на реках Первая Речка, Вторая Речка, Объяснения, Черная речка, Седанка, Богатая.

Биотестирование отобранных образцов проводилось с использованием микроводоросли *Scenedesmus quadricauda* в соответствии с методикой ФР 1.39.2007.03223. Согласно данной методики, подсчет численности клеток сценедесмуса проводился через 72 часа (острый эксперимент) и 168 часов (хронический эксперимент), водные вытяжки из донных отложений признавались токсичными, если они в хроническом эксперименте стимулировали или ингибировали рост сценедесмуса более чем на 30% по сравнению с контролем.

Анализ результатов биотестирования грунтов Камчатских рек показал, что в остром эксперименте отклонение численности клеток микроводорослей от контроля для всех станций варьирует от -93% до 83%. Наибольшую стимуляцию роста численности оказывают донные отложения рек Плотникова и Халактырка. В хроническом эксперименте отклонение численности клеток *S. quadricauda* от контроля для исследуемых станций изменяется в диапазоне от -93% до 109%. Максимальный стимулирующий эффект на рост микроводорослей оказывают донные отложения рек Мутнушка и Плотникова. Полученные высокие значения косвенно свидетельствуют о наличии в этих реках биогенных и органических веществ. Данные о наличии органики в реках Камчатки подтверждаются в исследовании Н.Н. Бортина и др. [1].

Наибольший ингибирующий эффект на рост сценедесмуса при 72-часовой экспозиции оказывают грунты рек Кирпичная, Плотникова, Камчатка, ручья Козельский, озера Халактырское. При 168-часовой экспозиции максимальное ингибирование роста численности сценедесмуса отмечено для проб донных отложений рек Кирпичная, Камчатка, ручья Козельский и озера Халактырское.

Это свидетельствует о хроническом загрязнении этих водных объектов токсичными веществами. В работе А.Е. Голованевой [2] отмечается, что воды озера Халактырское являются загрязненными за счет неочищенных сточных вод различного происхождения, экологическое состояние самого озера оценено как неудовлетворительное.

Процедура биотестирования донных отложений рек п-ва Муравьев-Амурский показала, что при 72-часовой экспозиции отклонения численности клеток тест-организма от контроля для станций находятся в диапазоне от -50% до 11%. Больше всего ингибируют рост численности *S. quadricauda* грунты со станций, расположенных в низовье реки Объяснения и верховье реки Первая Речка. В длительном эксперименте отклонение численности клеток микроводоросли от контроля варьирует от -62% до 158%. Максимальное замедление роста численности *S. quadricauda* оказывают донные отложения, отобранные в низовьях рек Объяснения и Вторая речка. Такие высокие значения говорят о хроническом загрязнении этих рек токсикантами. В исследовании Бортина Н.Н. и др. [3] подтверждаются данные о значительном загрязнении реки Объяснения различными сточными водами. Наибольший стимулирующий эффект оказывают донные отложения со станций, расположенных в низовьях рек Седанка и Богатая, что косвенно свидетельствует о наличии в этих участках органических и биогенных веществ.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в хроническом эксперименте все водные вытяжки из донных отложений рек п-ва Муравьев-Амурский можно признать токсичными, так как они вызывают отклонение численности тест-организма более 30%.

Сравнение результатов биотестирования для двух территорий показывает, что грунты камчатских рек оказывают преимущественно ингибирующий эффект на рост *S. quadricauda* оказывают, а донные отложения рек Приморья, напротив, в большей мере вызывают стимуляцию роста численности тест-организма.

Таким образом, на основании биотестирования водных вытяжек из грунтов исследуемых рек с использованием *S. quadricauda* можно предположить, что донные отложения рек Кирпичная, Камчатка, ручья Козельский и озера Халактырское (Камчатка) рек Первая Речка, Вторая Речка, Объяснения (Приморье) загрязнены токсичными веществами, а рек Плотникова, Мутнушка, Халактырка, Паратунка, Авача (Камчатка) Черная Речка, Седанка, Богатая (Приморье) – органическими веществами в значительных концентрациях.

Часть исследований выполнена по государственному заданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № FZNS-2022-0001.

Список литературы

- 1) Бортин Н.Н., Крапивинцев Н.В., Горчаков А.М., Милаев В.М. Оценка экологического состояния водных объектов полуострова Камчатка по гидрохимическим показателям // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение Т. 5. 2016. С. 50–74.
- 2) Голованева А.Е. Оценка степени сапробности вод озера Халактырского (Камчатский край) // Актуальные вопросы науки. Т. 32. 2017. С. 99–102.
- 3) Бортин Н.Н., Крапивинцев Н.В., Горчаков А.М., Белевцов А.А., Дьяченко К.Н. Река Объяснения как источник загрязнения бухты Золотой Рог // Чистая вода России. 2017. С. 205–211.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРООПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В ПЕРИОД ПОЛЯРНОЙ НОЧИ В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ 2023 Г.

Аглова Е.А.^{1,2}

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный

Ключевые слова: флуоресценция морской воды, фотосинтетически активная радиация, окрашенное растворенное органическое вещество, Баренцево море.

Исследование Арктического региона, подверженного активному технологическому развитию, а также влиянию глобального потепления – актуальная научная задача. Изучение пространственно-временных распределений биооптических характеристик морской воды позволяет оценивать влияние внешних факторов (речной сток, динамика вод, уровень фотосинтетически активной радиации и др.) на значения исследуемых параметров. Цель данной работы – изучить пространственное распределение биооптических характеристик морской воды в Баренцевом и Карском морях в период полярной ночи и исследовать взаимосвязь полученных результатов.

С использованием судового проточного измерительного комплекса ИО РАН [1], в состав которого входят: проточный 2х-канальный флуориметр ПФД-2 для определений интенсивностей флуоресценции хлорофилла *a* (Хл) и окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), термосалинограф Idronaut Ocean Seven 314 для измерений удельной электропроводности и температуры воды, универсальный малогабаритный прозрачномер ПУМ-А для определения величины показателя ослабления света $s(530)$, получены пространственные распределения биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева и Карского морей (93 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш») на глубине 5 м. Также в работе использовались данные, полученные с помощью измерителей поверхностной и подводной фотосинтетически активной радиации (ФАР) LISOR, малогабаритного измерителя спектрального поглощения с интегрирующей сферой ICAM, спектрального 4х-канального флуориметра ПФ-4 и диска Секки. Интересно отметить, что большая часть экспедиции проходила в условиях полярной ночи (17 ноября – 6 декабря) в Баренцевом море.

На основании анализа судовых данных получены следующие результаты:

- Получено хорошее соответствие ($R = 0.89$, $RMSE = 0.04$) между значениями показателя поглощения ОРОВ на пробах, полученных с помощью спектрофотометра с интегрирующей сферой ICAM [2], и значениями интенсивности флуоресценции ОРОВ по данным проточного измерительного комплекса. Показано незначительное занижение значений интенсивности флуоресценции ОРОВ, вызванное вкладом флуоресценции взвешенных частиц ($R = 0.98$, $RMSE = 0.02$). Полученные данные будут использоваться для валидации и настройки региональных алгоритмов, применяемых для восстановления биооптических характеристик морской воды: концентрации Хл, взвеси и показателя поглощения ОРОВ [3].
- По данным, полученным с помощью проточного измерительного комплекса, были определены положения атлантических водных масс в Баренцевом море, а также положение границ прибрежных вод с характерными повышенными значениями ОРОВ и, соответственно, показателя ослабления света морской водой. Полученное пространственное распределение гидрологических характеристик согласуется с данными реанализа. Связь гидрологических и гидрооптических характеристик рассматриваются в таких работах, как [4,5]. Влияние атлантической водной массы в Баренцевом море зарегистрировано на $70-73^\circ$ с.ш. 39° в.д. и

является заметным вплоть до участка трека 75° с.ш. 55° в.д. Разница значений температур атлантических и арктических вод на их границе 73.5° с.ш. 52° в.д. составляет более 0.5°С, достигая максимума в 1.5°С, соленостей – около 1 PSU.

- Зарегистрирована сильная отрицательная корреляция солености и интенсивности флуоресценции ОРОВ вдоль всего трека судна. Различия коэффициентов наклона этой зависимости могут быть полезны для разделения вкладов ОРОВ от различных источников. Интересно отметить малую изменчивость значений биооптических характеристик, по-видимому, связанную с проведением исследований в зимний период.
- Получен суточный ход значений падающей радиации в диапазоне ФАР в сравнении с функцией, пропорциональной солнечной постоянной в случае безоблачного неба. Низкие значения обусловлены временем и широтой проведения измерений. В частности, после 17 ноября солнце не поднималось над горизонтом. 17 ноября были измерены малые значения ФАР при ожидаемых нулевых значениях в период «сумерек». По вертикальным профилям ФАР выполнены расчеты значений коэффициента диффузного ослабления, необходимого для расчетов величин проникающей в водную толщу радиации.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ №21-77-10059. Автор выражает благодарность Д.И. Глуховцу, В.Д. Володину и В.Р. Таскаеву.

Список литературы

- 1) Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822.
- 2) Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В., Чикунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей, цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // *Океанология*. № 6(49). 2009. С. 934-939.
- 3) Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S., Yushmanova A., Salyuk P., Sahling I., Aglova E. Influence of the Accuracy of Chlorophyll-Retrieval Algorithms on the Estimation of Solar Radiation Absorbed in the Barents Sea // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14. № 19. 4995.
- 4) Аглова Е.А., Глуховец Д.И. Примеры влияния динамики вод на пространственное распределение интенсивности флуоресценции хлорофилла а в поверхностном слое Баренцева и Норвежского морей // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15. № 4. С. 54-62.
- 5) Салюк П.А., Глуховец Д.И., Липинская Н.А., Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Пономарев В.И., Аглова Е.А., Артемьев В.А., Латушкин А.А., Майор А.Ю. Изменчивость биооптических характеристик морской поверхности в районе Фолклендского течения и Патагонского шельфа // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18. № 6. С. 200–213.

АНАЛИЗ ВЕСЕННЕЙ И ОСЕННЕЙ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА "А" ФИТОПЛАНКТОНА В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ

Боровкова К.А.¹, Мошаров С.А.^{1,2}

¹Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, Калининград, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

Ключевые слова: фотосинтез, фотосинтетическая активность фитопланктона, Балтийское море, флуоресценция хлорофилла "а".

Флуоресценция хлорофилла «а» является полезным инструментом для быстрой и лёгкой диагностики фитопланктона, отражающим количество поглощенного света, не использованного в фотосинтезе. Флуоресценция хлорофилла «а» является механизмом регуляции поступающей световой энергии в фотосистемы клетки. Таким образом, фитопланктон оптимизирует ресурсы для роста, регулируя свой фотосинтетический аппарат качественно, количественно и функционально. Оптические свойства клеток фитопланктона чувствительны к изменениям температуры, интенсивности света, а также биогенных веществ. Таким образом, различные условия окружающей среды влияют на светопоглощение и свойства флуоресценции.

В Балтийском море, несмотря на длительные программы мониторинга, измерения фотосинтетической активности фитопланктона ещё не распространены достаточно широко. Поэтому, наши знания о факторах, контролирующих фотосинтез фитопланктона, все еще являются ограниченными [1].

Данная работа была направлена на то, чтобы соотнести изменчивость параметров фотосинтеза с условиями окружающей среды, зафиксированными в момент отбора проб. Акцент был сделан на сравнительную характеристику весеннего и осеннего сезонов в акваториях юго-восточной Балтики и Финского залива.

Экспедиционные исследования проводились в рейсе НИС «Академик Борис Петров» с 7 по 27 мая, а также с 10 по 24 ноября 2023 года. Пробы отбирались на разных горизонтах в пределах фотического слоя и ниже. Если отбор проб проходил при дневном освещении, параллельно измерялась фотосинтетически активная радиация (ФАР) с использованием комплекса LI-COR (квантовый датчик LI-190, подводный квантовый датчик LI-192 и интегратор Li-1500). Для работы был выбран импульсный флуориметр WATER-PAM-II (Walz). Данный метод позволяет получить данные с улучшенным пространственным и временным разрешением и с меньшими затратами, чем традиционные методы мониторинга фитопланктона.

Всего было отработано 12 станций в Финском заливе, 24 - в юго-восточной Балтике. В мае всего было отобрано 133 пробы, в ноябре - 112.

Образцы обрабатывались на борту. Часть проб фильтровалась через фильтры Whatman GF/F (номинальный размер пор 0,7 мкм), чтобы избежать воздействия других оптически активных компонентов.

В работе рассматриваются результаты измерений максимальной квантовой эффективности морского фитопланктона на разных горизонтах (F_v/F_m), рассчитанной с через фоновую (F_0) и максимальную (F_m) флуоресценцию. Флуоресценция измеряется в произвольных единицах на основе выходного сигнала прибора, который обычно представляет собой напряжение, генерируемое фотоумножителем или фотодиодом.

F_v/F_m представляет собой количество фиксированного CO_2 на один поглощенный фотон: с теоретическим максимумом $0,125 \text{ моль } C^{-1}$ [2]. Является одним из наиболее чувствительных индикаторов, которые можно отслеживать сразу, и показывает, насколько хорошо фитопланктон может ассимилировать свет или фотосинтезировать. Оптимальные значения F_v/F_m для живых

клеток варьируют от 0,2 до 0,7 отн.ед. Чем выше F_v/F_m , тем выше потенциальная фотосинтетическая способность.

В мае фотический слой колебался от 9 до 22м в Юго-Восточной Балтике, и от 2 до 7м в Финском заливе. Максимальные значения потенциальной фотосинтетической способности зафиксированы в пределах верхнего 20-метрового слоя. Значения F_v/F_m в Финском заливе были практически однородными по всему фотическому слою и ниже, что может быть связано с перемешанным слоем воды. В Юго-Восточной Балтике отмечается резкое снижение значений в термоклине и придонном слое.

В мае первичные процессы фотосинтеза проходили наиболее активно в Финском заливе. Поскольку на слабом свете в оптимальных условиях первичные процессы протекают с высокой интенсивностью, такие результаты могут быть связаны с уровнем освещённости в дни отбора проб: в ФЗ показатели падающей на поверхность ФАР не превышали 1200 мкмоль фотонов/м² в сек. и в среднем находились в диапазоне от 50 до 400 мкмоль фотонов/м² в сек, в то время как в ЮВБ значения достигали 1500 мкмоль фотонов/м² в сек. В целом, результаты измерений активной флуоресценции хлорофилла «а» показали, что максимальная квантовая эффективность на исследованных акваториях была достаточно высокой при малой вариабельности в пределах верхнего перемешанного слоя. Физиологическое состояние фитопланктона в верхнем слое находилось на высоком функциональном уровне.

Весь период измерений в ноябре характеризовался сильным перемешиванием вод и выхолаживанием. Фотический слой колебался от 5 до 10м. Показатели падающей на поверхность ФАР находились в пределах 12-17 мкмоль фотонов/м² в сек. В целом, можно отметить значительный диапазон значений – от 0,25 до 0,7 отн.ед. Самые низкие значения были зафиксированы в Финском заливе на нижних границах эвфотического слоя – 10-20 метров. Юго-восточная Балтика всё ещё характеризовалась высоким уровнем фотосинтетической активности, а также равномерным распределением значений по глубине. Значения колебались от 0,6 до 0,72 отн.ед. по всему эвфотическому слою и ниже.

Сравнивая результаты измерений в мае и ноябре можно утверждать, что фотосинтетическая активность фитопланктона в мае в среднем была выше. При этом как в ФЗ, так и в ЮВБ отмечается широкий диапазон значений. Показатель незначительно снижается с глубиной, но всё ещё остаётся на достаточно высоком уровне.

Массив данных за ноябрь показал, что фитопланктон в начале зимнего сезона сохраняет высокий уровень фотосинтетической активности. В связи с зимним выхолаживанием F_v/F_m был практически однородным.

Работа выполнена в рамках НИР №FZWM-2021-0015 «Временная изменчивость потоков углерода на карбоновом полигоне в Балтийском море».

Список литературы

- 1) Lawrenz E. Predicting the electron requirement for carbon fixation in seas and oceans / E. Lawrenz, G. Silsbe, E. Capuzzo, P. Ylo-stalo, R. M. Forster //PloS one. – 2013. – Т. 8. – №. 3. – С. 37.
- 2) Falkowski P.G. Aquatic photosynthesis / P.G. Falkowski, Raven J. A. // Princeton University Press. – 2013.

ВЛИЯНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ НА АЛЬБЕДО ОКЕАНА

Глуховец Д.И.^{1,2}, Шеберстов С.В.¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г. Москва

Ключевые слова: альbedo океана, поглощение солнечной радиации, гидрооптическое моделирование, хлорофилл-а, кокколитофоридное "цветение", Черное море, Баренцево море.

В океанологии традиционно не заслуженно мало внимания уделяется влиянию биооптических характеристик морской воды на альbedo океана. В частности, в монографии [1], посвященной радиационному режиму океанов, прозрачность и «цветность» морской воды лишь упоминаются в контексте влияния волнения на значения альbedo. В современной циркуляционной модели NEMO [2] используются результаты работы [3], в которой вклад выходящего из воды излучения фиксирован. Принимается, что для интервала длин волн 280-2800 нм этот вклад составляет $0,005 \pm 0,0005$. При этом считается, что такое значение соответствует большинству вод Мирового океана. Цель работы состоит в проверке этого утверждения, а также демонстрации изменчивости альbedo океана, обусловленной влиянием гидрооптических характеристик природных вод, в частности, в случае интенсивного кокколитофоридного «цветения».

С использованием численных методов решения уравнения переноса излучения в системе атмосфера-океан HydroLight и DISORT рассчитаны значения альbedo океана для набора первичных гидрооптических характеристик, соответствующих различным ситуациям: водам с концентрациями хлорофилла (Хл) 1 и 10 мкг/л, а также случаю интенсивного кокколитофоридного «цветения» (8-12 млн кл./л). Расчеты проводились для случаев безоблачного неба и отсутствия ветра. Различия результатов двух алгоритмов незначительны в области зенитных углов солнца до 60° , при больших углах расхождение обусловлено различием используемых атмосферных моделей. Показано, что для вод первого типа изменчивость Хл от 1 до 10 мкг/л не приводит к изменениям значений альbedo. В случае интенсивного кокколитофоридного «цветения» альbedo океана в интервале 400-700 нм может увеличиваться более чем в три раза. Это не учитывается в широко используемом источнике данных об альbedo океана [3]. Расчет среднемесячных значений альbedo для точек в регионах, в которых происходят регулярные «цветения», показал, что наличие интенсивного кокколитофоридного «цветения» существенно увеличивает среднемесячные значения альbedo: более чем вдвое в Баренцевом море и почти втрое в Черном. Для выбранных точек выполнен расчет величин поглощенного в толще морской воды излучения в зависимости от времени суток: наличие «цветения» существенно уменьшает величины поглощенной радиации. При этом неточности определения значений альbedo при больших зенитных углах солнца не приводят к заметным ошибкам в расчетах дневного потока поглощенной в толще морской воды радиации в летние месяцы как в Черном, так и в Баренцевом море. Показано, что принятый ранее вклад в альbedo выходящего из воды излучения, составляющий $0,005 \pm 0,0005$, соответствует только водам первого типа. Интенсивное «цветение» кокколитофорид может привести к увеличению этого вклада более чем в 14 раз. Предложена простая формула для коррекции значений альbedo с учетом влияния первичных гидрооптических характеристик. Полученные результаты показывают важность учета гидрооптических характеристик при расчетах альbedo океана, в частности, в областях «цветения» кокколитофорид, для оценки роли которых в Баренцевом и Черном морях в дальнейшем планируется использовать материалы Атласа биооптических характеристик ИО РАН [4].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №21-77-10059.

Список литературы

- 1) Тимофеев Н.А. Радиационный режим океанов. Киев: Наукова думка, 1983. 247 с.
- 2) Madec G., Bourdallé-Badie R., Bouttier P.A., Bricaud C., Bruciaferri D., Calvert D., Chanut J., Clementi E., Coward A., Delrosso D., Ethé C. NEMO Ocean engine. 2017.
- 3) Payne R.E. Albedo of the sea surface // Journal of Atmospheric Sciences. 1972. V. 29, № 5. P. 959–970.
- 4) Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. // Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН. Ответственный редактор д.ф.-м.н. О.В. Копелевич. Москва, 2018.140 с. https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf.

ЗНАЧИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ МОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ ВОД В ПОЯВЛЕНИИ ЭКСТРАВЫСОКОЧИСЛЕННЫХ ПОКОЛЕНИЙ КАРАГИНСКОЙ ГОРБУШИ

Дедерер Н.А.¹, Шевляков Е.А.¹, Островский В.И.², Хен Г.В.¹

¹ Тихоокеанский филиал ВНИРО (ТИНРО), 690091, г. Владивосток

² Хабаровский филиал ВНИРО (ХабаровскНИРО), 680038, г. Хабаровск

Ключевые слова: Горбуша, динамика численности, температура, прогнозирование, морское побережье, Восточная Камчатка, условия среды, покотные миграции.

Хронология промышленного использования запасов карагинской горбуши насчитывает более 110 лет. Промышленную добычу лососей на северо-восточном побережье Камчатки на заре коммерческого рыболовства вели отдельные русские рыбопромышленные компании, а также иностранные предприятия. На протяжении 1920-х гг. средний вылов лососей на восточной Камчатке составлял около 25 тыс. т [3], из которых горбуши вылавливали только около 4 тыс. т. Удаленные районы промысла, невысокие производственные мощности, отсутствие надежных способов сохранения выловленной продукции, а также наличие более ценных видов лососей предопределяли слабый интерес промышленности к освоению запасов карагинской горбуши на следующие годы. Ситуация мало менялась вплоть до начала 1970-х гг., доминирование смежных линий в уловах горбуши чередовалось практически каждое десятилетие, средний ежегодный вылов составлял около 9,2 тыс. т, максимальный – 22,6 тыс. т. Ситуация изменилась с 1970-х гг., когда в уловах постоянно стала доминировать линия нечетных лет воспроизводства, в период 1970-х – первой половины 1980-х гг. их уровень достиг 40 тыс. т, а в первом десятилетии 2000-х гг. уже – 83 тыс. т. С 2009 г. начинается новый этап состояния запасов карагинской горбуши. Так, за 2009-2023 гг. уловы 6 раз превышали уровень 200 тыс. т, а суммарный вылов за 15 лет составил 2,055 млн т, из них в четные годы – почти 400 тыс. т. Каждый из этапов роста уловов горбуши провоцировал соответствующее развитие рыбной промышленности в регионе.

Высокий темп увеличения запасов горбуши, в том числе и в смежной, ранее неурожайной, четной линии воспроизводства, не может не вызывать интереса специалистов, а надежность предсказания развития событий в краткой и среднесрочной перспективе в таких условиях особенно востребована. Горбуша в силу особенностей своей экологии, популяционной организации, способности быстро наращивать численность формирует отклик на изменения условий среды максимально быстро. В частности, большой интерес исследователей вызывает раннеморской период жизни горбуши [1-2, 4], молодь которой в мае-июне в массе скатывается из рек в морские прибрежные акватории. Выживаемость поколений горбуши в этот период варьирует в очень больших пределах, в отдельных случаях смертность может составлять свыше 98% [1].

Целью настоящего исследования служило выявление взаимосвязи между появлением экстравысокочисленных поколений горбуши и изменчивостью температурного режима в прибрежных водах в период покотной миграции её молоди. Попутно решалась задача поиска набора факторов, маркирующих переход воспроизводства на качественно новый уровень численности, и формализация выявленных закономерностей в моделях, используемых в прогнозировании состояния запасов карагинской горбуши.

В качестве массивов исходных данных использовались архивные матералы Камчатского филиала ВНИРО о динамике покотных миграций молоди горбуши, собранных на контрольной р. Хайлюля, впадающей в Карагинский залив. Подекадная температура поверхности воды Карагинского залива с пространственным разрешением 0,25*0,25° привлекалась из открытых баз данных японского метеорологического агентства JMA, ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/database.html. Численность

рыб, вернувшихся из моря в конкретном году, рассчитывали суммированием числа выловленных промышленностью рыб и пропущенных на нерестилища. Численность выловленных рыб находили делением массы улова, известной из официальных источников, на среднюю массу тела одной рыбы, оцененной по результатам биологического анализа сотрудниками Камчатского филиала ВНИРО.

В рамках работы была рассмотрена изменчивость сроков покатной миграции молоди горбуши из р. Хайлюля в прилегающие акватории Карагинского залива. Проанализирована связь температуры прибрежных вод в 1978-2020 гг. с динамикой численности двух генеративных линий карагинской горбуши. Для получения средневзвешенных оценок температуры прибрежных вод в период покатной миграции средняя температура воды в каждую декаду периода ската приводилась к доле покатников, скатившихся в эту декаду. Таким образом, удалось проследить в какие условия среды попала основная доля покатников горбуши в морском побережье. Сделан вывод об оптимальных условиях ската молоди после 2002 г., в этот период температура воды составляла не менее 5,6°C, в отдельные годы достигая 9,9°C (в среднем 7,8°C), с устойчивой тенденцией к росту. Высказывается предположение, что к концу первого десятилетия 2000-х гг. фактор развития кормовой базы молоди в морском побережье, перестал играть лимитирующую роль при формировании поколений карагинской горбуши. Предложена оригинальная модель (обучающая выборка включает период 1975-2020 гг.) динамики численности горбуши учитывающая в качестве независимых переменных температуру прибрежных вод в конце июня и численность нереста родителей с приемлемым качеством описания ($R^2=0,791$). Была предпринята попытка получения прогнозных оценок на перспективу поколений вернувшихся в 2021-2023 гг., получен удовлетворительный результат. Сделан вывод о необходимости пересмотра представлений о величине ориентира пропуска производителей на нерестилища и моделей управления промыслом

Работа выполнена по личной инициативе, без дополнительного финансирования.

Список литературы

- 1) Карпенко В.И. Ранний морской период жизни тихоокеанских лососей. М.: Изд-во ВНИРО, 1998. 165 с.
- 2) Коваль М. В., Морозова А. В. Состав ихтиофауны, распределение и пищевые отношения массовых видов рыб в эпипелагиали Камчатского залива в период нагула молоди тихоокеанских лососей // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2013. № 31. С. 106–121.
- 3) Курмазов А.А. Освоение побережий и развитие рыболовства в Беринговом море. Владивосток: ТИНРО-Центр, 2006. 259 с.
- 4) Лепская Е.В., Бонк Т.В., Сушкевич А.С., Курбанова Л.В., Коваль М.В., Лозовой А.П., Кожевников А.В., Коломейцев В.В., Кириллова Е.А. Условия среды в морском побережье основных бассейнов воспроизводства горбуши *Oncorhynchus gorbuscha* Западной Камчатки // Исслед. водн. биол. ресурсов Камчатки и сев.-зап. части Тихого океана: Сб. науч.тр. КамчатНИИ рыб. хоз-ва и океанографии. 2019. Вып. 53. С. 22–33.

СУТОЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА НИСХОДЯЩЕГО ПОТОКА ИЗЛУЧЕНИЯ В КАРСКОМ МОРЕ

Дерягин Д.Н., Глуховец Д.И.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: нисходящий поток излучения, первичная продукция, ФАР

Вовлеченность арктического региона в новую стратегию развития Арктической зоны увеличивает техногенную нагрузку на регион, а вместе с продолжающимися климатическими изменениями делает ещё более актуальным исследование связанных с Арктикой экосистем. Первичная продукция — это один из важнейших показателей морской экосистемы [1], который напрямую зависит от величины фотосинтетически активной радиации (ФАР), а так же состава нисходящего потока излучения, падающих на поверхность моря [2-3].

Целью работы является исследование суточных и межсуточных изменений спектрального состава нисходящей облучённости в Карском море. Измерения проводились в ходе 92 рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море, в предзимний период (с 5 октября по 5 ноября 2023 года), который характеризуется коротким световым днем, малыми зенитными углами солнца, а также малыми значениями облучённости. В качестве инструмента для проведения измерений использовался спектрорадиометр RAMSES, установленный на палубе, в корпусе, стабилизирующем датчик по вертикали. Измерение спектров поверхностной облучённости выполнялось непрерывно, в светлое время суток на ходу судна раз в 1 минуту. Диапазон измерения длин волн — от 318 до 952 нм.

Значения суточной ФАР варьировались от максимальных $8 \text{ Э/м}^2 \cdot \text{день}$ 5 октября, до минимального значения $0,07 \text{ Э/м}^2 \cdot \text{день}$ 21 октября, когда солнце всё время находилось под горизонтом. Межсуточные средние изменения значений облучённости на отдельных длинах волн 430, 555 и 630 нанометров показали убывание, соответствующее измеренным значениям ФАР — с минимумом 21 октября, $10 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{нм})$.

Для изучения изменений спектрального состава нисходящего потока излучения был использован следующий метод: каждый спектр был нормирован на значение облучённости на длине волны, которая была определена по максимальному значению облучённости за день. Таким образом, эта длина волны является точкой, где значение освещённости относительно стабильно и на него не оказывают существенного влияния эффекты рассвета или заката. Благодаря этому, она обеспечивает опорную точку для сравнения по всем спектрам. Этот метод позволяет сравнивать относительные изменения спектрального состава солнечного излучения с течением времени, без учета общего изменения интенсивности света. Так, спектры облучённости 5 октября демонстрируют заметные изменения формы и интенсивности в течение выбранного периода времени и увеличение доли красной части спектра (620–750 нм), по сравнению с синей (400–495 нм). Межсуточные изменения значений длины волны, в которой происходит точка поворота происходят в сторону явного уменьшения значений, то есть смещения в область синей части спектра. От 549,1 нм 5 октября значение резко уменьшилось до 478,9 нм 7 октября, после чего постепенно уменьшалось до 452,16 нм 17 октября, с незначительными изменениями в последующие дни.

Фитопланктон имеет пики поглощения в двух разных областях спектра света — вблизи 440 нм (синей) и 630 нм (красной). Соотношение красного и синего света, поглощаемого фитопланктоном, оказывает влияние на развитие фитопланктона [4–5] и продукцию хлорофилла-а. Дальнейшее исследование суточной изменчивости спектрального состава нисходящего потока излучения и учёт этой изменчивости может позволить построить более точные модели оценки первичной продукции и хлорофилла-а [1].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ №21-77-10059.

Список литературы

- 1) Demidov A.B., Kopelevich O.V., Mosharov S.A., Sheberstov S.V., Vazyulya S.V. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production: Development and skill assessment of regional algorithms // Journal of Sea Research, 2017. – Т. 125. Modelling Kara Sea phytoplankton primary production. – С. 1–17.
- 2) Humphrey G.F. The effect of the spectral composition of light on the growth, pigments, and photosynthetic rate of unicellular marine algae // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1983. – V. 66. – No. 1. – P. 49–67.
- 3) Kubín Š., Borns E., Doucha J., Seiss U. Light Absorption and Production Rate of *Chlorella vulgaris* in Light of Different Spectral Composition // Biochemie und Physiologie der Pflanzen, 1983. – V. 178, No. 2–3. – P. 193–205.
- 4) Morel A. Light and marine photosynthesis: a spectral model with geochemical and climatological implications // Progress in Oceanography, 1991. – Т. 26. Light and marine photosynthesis. – № 3. – С. 263–306.
- 5) Vadiveloo A., Moheimani N.R., Cosgrove J.J., Bahri P.A., Parlevliet D. Effect of different light spectra on the growth and productivity of acclimated *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae) // Algal Research, 2015. – V. 8. – P. 121–127.

ФЕНОЛОГИЯ ВЕСЕННЕГО ЦВЕТЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В БЕРИНГОВОМ МОРЕ

Кивва К.К.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», г. Москва

Ключевые слова: субарктическая зона, Тихий океан, хлорофилл, MODIS, статистика.

Весеннее «цветение» фитопланктона (ВЦФ) в морях высоких широт обеспечивает создание большей части годовой первичной продукции. Сроки начала и окончания ВЦФ обусловлены комбинацией физических и биологических факторов (условия освещенности, мощность перемешанного слоя, наличие питательных веществ, скорость выедания фитопланктона зоопланктоном и т.д.) [1, 2]. В конкретном районе океана в разные годы ВЦФ может протекать в разные сроки, в разных условиях и с разной интенсивностью. В том числе от этого зависит то, какая доля органического вещества, формируемого во время ВЦФ, будет потреблена в пелагиали, а какая поступит на дно моря и потенциально станет пищей донной фауны. Поэтому сроки ВЦФ во многом определяют функционирование экосистем в течение года, включая их промысловую часть [3]. Таким образом, вопросы оценки фенологических параметров «цветения» и их межгодовой изменчивости в отдельных районах Мирового океана имеют высокую актуальность. Спутниковые данные по концентрации хлорофилла-а (Хл-а) позволяют выполнять оценки фенологических параметров «цветения» для обширных акваторий [4]. Они уже использовались для изучения некоторых аспектов фенологии ВЦФ, в том числе в Беринговом море [3, 5], однако существующие оценки либо имеют очень грубое пространственное разрешение, либо ограничены отдельными районами моря. Цель данной работы – оценить межгодовую изменчивость фенологических параметров ВЦФ в Беринговом море по спутниковым данным.

В основу работы положены ежедневные спутниковые данные по концентрации Хл-а (спутник Aqua, спектрорадиометр MODIS, стандартный алгоритм ОСЗМ, номинальное пространственное разрешение 4 км, интервал лет 2003–2022). Поскольку такие данные содержат большое количество пропусков, что не позволяет оценить фенологические параметры хода концентрации Хл-а, выполняли следующую процедуру их обработки. Для каждой даты значения за эту и две соседние даты распределяли по равноплощадным ячейкам размером 25 × 25 км; в качестве оценки концентрации Хл-а использовали медиану попавших в ячейку значений. Затем проводили поиск таких ячеек с отсутствующими значениями, для которых было минимум две противоположно расположенных соседних ячейки с данными. В таких случаях пустая ячейка заполнялась средним значением всех соседних ячеек. После такой пространственной интерполяции, тем не менее, далеко не все даты в каждой ячейке имели значения концентрации Хл-а. Расчёты выполняли для тех ячеек, для которых в выбранном году было минимум 50 значений. Непрерывный ряд Хл-а между крайними датами получали с помощью локальной полиномиальной регрессии (т.н. LOESS – locally estimated scatterplot smoothing). После такой обработки вычисляли даты начала «цветения», достижения максимума концентрации Хл-а, а также максимального роста концентрации Хл-а, используя методы, предложенные для других районов Мирового океана [4, 6], но несколько модифицированные с учётом особенностей хода Хл-а на исследуемой акватории.

Результаты показали, что наиболее рано ВЦФ начинается вдоль восточного побережья Камчатки, в Бристольском заливе, а также вдоль изобаты 100 м на восточном шельфе моря (медиана даты начала «цветения» попадает на начало апреля). В центре глубоководной части моря медиана начала ВЦФ приходится на середину мая. На остальной части восточного шельфа, а также вдоль западного шельфа моря «цветение» чаще всего начинается в конце мая или в июне. Наибольшая изменчивость фенологических параметров ВЦФ (разность квантилей 0,9 и 0,1 больше 60 суток)

наблюдается на обширной акватории в южной глубоководной части моря, вдоль западного шельфа, в Анадырском заливе. В северной глубоководной части моря этот параметр составляет 20–40 суток.

Основное достижение работы заключается в том, что впервые получены оценки фенологических параметров ВЦФ для всей акватории Берингова моря с 2003 по 2022 годы. Работа будет продолжена в двух направлениях. Во-первых, важно выделить районы моря с однонаправленными тенденциями в сроках ВЦФ. Во-вторых, необходимо установить факторы, определяющие сроки и продолжительность ВЦФ, и построить статистическую модель зависимости сроков ВЦФ от этих факторов.

Работа выполнена по инициативе автора.

Список литературы

- 1) Huisman, J.E.F. Critical depth and critical turbulence: two different mechanisms for the development of phytoplankton blooms / J.E.F. Huisman, P. van Oostveen, F.J. Weissing // *Limnology and oceanography*. – 1999. – V. 44. – №. 7. – P. 1781–1787.
- 2) Behrenfeld, M.J. Resurrecting the ecological underpinnings of ocean plankton blooms / M.J. Behrenfeld, E.S. Boss // *Annual review of marine science* – 2014. – Vol. 6. – P. 167–194.
- 3) Кивва, К.К. Сезонная и межгодовая изменчивость поля концентрации хлорофилла-а в Беринговом море по спутниковым данным / К.К. Кивва, А.А. Кубряков // *Исследование Земли из космоса*. – 2021. – № 4. – С. 28–45.
- 4) Phenology and time series trends of the dominant seasonal phytoplankton bloom across global scales / K.D. Friedland, C.B. Mouw, R.G. Asch [et al.] // *Global Ecology and Biogeography*. – 2018. – Vol. 27(5). – P. 551–569.
- 5) Spring phytoplankton bloom phenology during recent climate warming on the Bering Sea shelf / J.M. Nielsen, M.F. Sigler, L.B. Eisner [et al.] // *Progress in Oceanography*. – 2024. – Vol. 220. – P. 103176.
- 6) Brody, S.R. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation / S.R. Brody, M.S. Lozier, J.P. Dunne // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2013. – Vol. 118(5). – P. 2345–2357.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СМЕРТНОСТИ РЫБ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Князев А.С.

Байкальский государственный университет, г. Иркутск

Ключевые слова: сравнительный анализ методов, вычислительные эксперименты, статистические испытания, динамика смертности, голомянки Байкала.

В материалах работы представлена технология сравнения алгоритмов оценки коэффициента смертности рыб озера Байкал на основе вычислительных экспериментов.

Одна из задач при создании моделей динамики численности и биомассы отдельных видов рыб – определение динамики смертности на основе распределения рыб по возрастам по данным экспериментальных отловов. Имеется три источника возможных погрешностей в оценках динамики смертности: неверная исходная модель динамики, не представительность используемой выборки и погрешность используемого метода оценки параметров модели по располагаемым выборкам. Излагаемая технология предназначена для минимизации третьего вида погрешности. Технология иллюстрируется на сопоставлении алгоритмов обработки данных о возрастном составе в отловах большой и малой голомянки из работы [1].

Традиционно обоснование алгоритмов осуществляется на основе теоретических исследований их свойств при возрастании до бесконечности объемов выборки. Используются такие характеристики получаемых оценок, как состоятельность, асимптотическая несмещенность, асимптотическая эффективность. В реальности оценки параметров законов распределения производятся на базе ограниченных объемов выборки (в том числе из-за больших затрат на оценку возраста отдельных экземпляров рыб) и характеристики методов при больших объемах выборок мало пригодны в таких условиях. Рассматриваемая в работе технология расчета характеристик алгоритмов оценки параметров по ограниченному объему выборки позволяет также исследовать влияние на качественные характеристики алгоритмов объемов используемых выборок.

Показано, что в зависимости от выбора алгоритма могут быть получены существенно разные результаты (на порядок) на одних и тех же данных при оценке динамики смертности рыб. Таким образом, представленные материалы могут способствовать выбору алгоритма или оценке погрешности уже существующей модели и внесению необходимых корректировок в результаты.

Технология базируется на многократной имитации методом Монте-Карло выборок заданного объема, для каждой из которых осуществляется оценка параметров модели исследуемым алгоритмом оценки параметров. В результате статистической обработки оценок определяются различные характеристики качества данного алгоритма для данной модели и данного значения ее параметров. В результате варьирования исходных значений параметров определяются устойчивые соотношения характеристик качества разных алгоритмов.

В качестве характеристик качества алгоритмов в разработанном программно-вычислительном комплексе используются показатели: смещение математического ожидания оценок по сравнению с истинным значением параметров; среднеквадратические отклонения от истинных значений и от математического ожидания; вероятность попаданий в заданный интервал отклонений от истинных значений и математического ожидания оценок и др.

В данной работе рассматривается модель динамики смертности, приводящая к усеченному экспоненциальному закону распределения случайной величины возраста рыб. Приводятся аргументы о возможности использования такой модели для описания динамики смертности большой и малой голомянки. Оцениваемыми являются два взаимосвязанных параметра: вероятность дожития до следующего года рыбы дожившей до данного года; коэффициент смертности равный со знаком минус натуральному логарифму предыдущего показателя.

Приводятся результаты анализа пяти различных типов алгоритмов расчета коэффициента смертности рыб с тремя видами весовых коэффициентов для первых четырех из них [2].

- Оценка условной вероятности дожития до следующего года в виде взвешенной средней арифметической от соотношений количества рыб в выборке соседних возрастов;
- Оценка условной вероятности дожития до следующего года в виде взвешенной средней геометрической от соотношений количества рыб в выборке соседних возрастов;
- Оценка коэффициента смертности рыб с использованием метода наименьших квадратов в логарифмической шкале;
- Оценка коэффициента смертности рыб методом наименьших квадратов в исходной шкале;
- Оценка коэффициента смертности рыб методом максимального правдоподобия.

Рассмотрены три способа задания весовых коэффициентов:

- Одинаковые весовые коэффициенты;
- Весовые коэффициенты пропорциональные оценкам численности объектов в разных возрастных группах;
- Весовые коэффициенты, пропорциональные обратным значениям дисперсий оценок вероятностей нахождения объектов в рассматриваемых возрастных группах.

По результатам сравнения рассматриваемых алгоритмов аппроксимации даны рекомендации по их выбору, а также по минимально необходимому объёму исходной выборки. В частности, с точки зрения минимизации смещения и дисперсии из рассматриваемых алгоритмов лучшими показали себя метод максимального правдоподобия и метод наименьших квадратов в исходной шкале с применением весовых коэффициентов пропорционально обратным значениям дисперсий оценок вероятностей нахождения объектов в рассматриваемых возрастных группах. Среди алгоритмов с наименьшими вычислительными затратами можно отметить результаты, полученные методом наименьших квадратов в логарифмической шкале с использованием весовых коэффициентов пропорционально оценкам численности объектов в разных возрастных группах.

Минимальный рекомендуемый по результатам работы объём выборки – 250-300 рыб. В этом случае смещение математического ожидания при использовании метода максимального правдоподобия – до 0,5%. При аппроксимации методом наименьших квадратов в логарифмической шкале с использованием весовых коэффициентов пропорционально оценкам численности объектов в разных возрастных группах от 1% до 1,5%. Для методов, основанных на усреднении коэффициента дожития при указанном объёме выборки смещение составило от 5,2% до 7,6%.

нет

Список литературы

- 1) Стариков Г.В. Голомянки Байкала / Г.В. Стариков. - Новосибирск: Наука. Сиб.отд-ние, 1977. - 93 с.
- 2) Зоркальцев В.И. Сравнительный анализ алгоритмов оценки параметров закона распределения случайной величины на основе вычислительных экспериментов / В.И. Зоркальцев, А.С. Князев. — DOI 10.17150/2713-1734.2023.5(3).350-366. — EDN WDEIME // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2023. — Т. 5, № 3. — С. 350 366.

БИОопТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИИ 2023 ГОДА

Мольков А.А.^{1,2}, Капустин И.А.^{1,2}, Ермошкин А.В.^{1,2}, Лещев Г.В.^{1,2}, Доброхотова Д.В.^{1,2},
Кольцова Е.С.¹, Коновалов Б.В.^{1,3}, Дроздова А.Н.^{1,3}, Пелевин В.В.³, Богатов Н.А.²,
Кириллов А.Г.²

¹Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

²Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Ключевые слова: биооптические характеристики, Волга, Куйбышевское водохранилище, Чебоксарское водохранилище, дистанционное зондирование, спутниковый мониторинг, лидар УФЛ-9.

Изучение качества воды пресноводных акваторий является одной из основных задач экологического контроля, направленных на создание систем мониторинга с применением передовых технологий, таких как спутниковые данные, беспилотные аппараты, лидары, погружные зонды и флуориметры и другие [1].

Данная работа раскрывает результаты исследования биооптических характеристик и их изменчивости на акватории средней Волги (Куйбышевское и Чебоксарское водохранилища) на основе данных двух экспедиций 2023 года.

Натурные измерения хлорофилла-*a*, взвешенного и органического веществ в верхнем слое воды проводились с помощью флуоресцентного лидара УФЛ-9, разработанного в ИО РАН [2]. Для измерения течений использовался акустический доплеровский профилограф течений ADCP Workhorse Monitor 1200 kHz. Зонд YSI EXO 2, интегрированный в проточную систему, регистрировал характеристики воды с горизонта 0.5 м, а именно температуру воды, электропроводность, растворенный кислород, мутность (далее пересчитываемую во взвесь), а также хлорофилл-*a* и флуоресценцию органики (пересчитываемую в показатель поглощения $a(440)$). Данные получены с высоким пространственным разрешением (3 м) для участка акватории протяженностью 2x500 км, синхронизированы при обработке и проанализированы для построения карт пространственно-временного распределения всех параметров качества воды.

Совместный анализ обеих экспедиций показал, что на протяжении всего маршрута, от Нижнего Новгорода до Камского устья, наблюдается изменчивость биооптических характеристик различных пространственно-временных масштабов. Установлено, что концентрации хлорофилла-*a* варьировались в диапазоне 0.8-45 мкг/л с локальными мелкомасштабными возрастаниями до 256 мкг/л в слабопроточных районах в условиях ясной штилевой погоды. Для взвешенного вещества диапазон концентраций составил 2.5-20 мг/л, где высокие значения наблюдались в основном в условиях ветро-волнового воздействия в районах, подверженных эрозии берегов (например, глиняные берега у Камского устья) и на мелководье. Показатель поглощения $a(440)$, как индикатор растворенной органики, менялся в диапазоне от 1.2 до 3.1 м⁻¹. При этом установлено несильное, но регулярное изменение этого индикатора напротив большинства притоков, включая камскую воду в районе слияния Волги и Камы.

В части временной изменчивости, обнаружены сезонные вариации показателя поглощения. Так сентябрьские значения показателя поглощения $a(440)$, в сравнении с летними, на русле р.Кама снизились с 1.5 м⁻¹ до 1.3 м⁻¹, на пойме по обеим сторонам от русла – с 2.0 м⁻¹ до 1.6 м⁻¹, на русле р.Волга – с 3.1 м⁻¹ до 1.8 м⁻¹, по бокам от русла – с 2.8 м⁻¹ до 2.1 м⁻¹, на Оке – с 2.0 м⁻¹ до 1.5 м⁻¹. Зарегистрированное снижение может быть связано с фотодеградацией органических веществ и их потреблением развивающимся фитопланктоном.

Комплексный анализ данных показал, что наиболее вариативным в пространстве и времени по биооптическим характеристикам оказалась озерная часть Куйбышевского водохранилища в районе слияния Волги и Камы. Здесь одновременно наблюдаются мутные и продуктивные воды, что создает значительные трудности при разработке биооптических моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-17-00071.

Список литературы

- 1) Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes. *Remote Sensing*. 2019. 11(1). P. 64. <https://doi.org/10.3390/rs11010064>
- 2) Palmer S.C., Pelevin V.V., Goncharenko I.V., Kovács A., Zlinszky A., Présing M., Horváth H., Nicolás-Perea V., Balzter H., Tóth V. Ultraviolet Fluorescence Lidar (UFL) as a Measurement Tool for Water Quality Parameters in Turbid Lake Conditions. *Remote Sensing*. 2013. 5. P. 4405–4422. <https://doi.org/10.3390/rs5094405>

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ЮЖНОМ ОКЕАНЕ ПО ДАННЫМ БУЕВ БИО-АРГО

Кубрякова Е.А.^{1,2}, Бакуева Я.И.¹, Кубряков А.А.¹

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь,

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: Южный океан, Антарктика, концентрация хлорофилла «а», буи Био-Арго, подповерхностный максимум Хл, прикромочные цветения, вынос льдов, апвеллинг, АЦТ

Исследования биопродуктивности Антарктического региона имеют большую прикладную ценность, поскольку здесь сосредоточено огромное количество биологических ресурсов, представляющих собой большой потенциал для развития отечественного рыболовства. Экосистема Южного океана характеризуется рядом уникальных особенностей, основными из которых являются большое количество главных биогенных элементов (нитратов, фосфатов) и относительно низкая биомасса фитопланктона.

В Южном океане наблюдается значительная пространственная изменчивость распределения концентрации хлорофилла «а» (Хл). Наиболее полная информация об этой пространственной неоднородности была получена по данным спутниковых оптических измерений [1-3]. Эти данные позволили впервые определить особенности сезонного хода Хл на поверхности в различных районах Южного океана [4, 5]. В работах [4, 5] была продемонстрирована значительная изменчивость распределения Хл в пространстве с наличием высокопродуктивных зон и “океанических пустынь”.

Несмотря на большое количество спутниковой информации, получаемой с оптических сканеров цвета моря, эти данные характеризуют только поверхностный слой. Они недоступны при наличии облачности, подо льдом и практически отсутствуют в зимний период. На широтах южнее 60° только 1-10 % годового массива данных доступны для расчета концентрации Хл. Достаточно продолжительное время считалось, что в Южном океане подповерхностный максимум Хл выражен слабо. Однако исследования последних лет показали, что в глубоководной части Южного океана он формируется практически каждый летний сезон [6]. В этих работах было показано, что распределение Хл характеризуется наличием мощных глубинных максимумов, динамика изменчивости Хл в которых может значительно отличаться от поверхностной, что не учитывается при использовании спутниковых данных.

Вместе с запуском проекта Био-Арго в 2010 г. в Южном океане, стали доступны измерения всплывающих буев типа Арго с установленными на них биооптическими приборами. Эти данные дают возможность получать непрерывные одновременные измерения физических, биологических и химических параметров с высоким вертикальным разрешением (1 м). В Южном океане в рамках проекта SOCCOM (Southern Ocean Carbon and Climate Observations and Modeling) с 2010 по 2021 гг. запущено более 110 буев Био-Арго, измеряющих различные биооптические характеристики с временным разрешением 5 - 10 дней. По этим измерениям в исследуемом районе было получено более 23 тысяч профилей Хл. Долговременные измерения биооптических характеристик в глубоководной части морей и океанов с такой временной и вертикальной дискретностью ранее были недоступны. Эти данные дали большое количество новой информации о причинах изменчивости экосистемы Южного океана. В России единственной работой с использованием этих данных была работа [6], в которой достаточно подробно анализировалось вертикальное распределение Хл, изменчивость положения и интенсивности подповерхностного максимума в проливе Дрейка.

В настоящей работе на основе измерений 119 буев Био-Арго за 2010-2021 гг. проведено исследование особенностей пространственно-временной изменчивости вертикального распределения

Хл в различных районах Южного океана. Результаты показывают, что на изменчивость Хл существенное влияние оказывают два разнесенных по времени и пространству физических механизма поступления макронутриентов. В Антарктическое лето (январь-март) максимальный рост Хл наблюдается в трех областях интенсивного выноса таящего льда от Антарктиды (море Уэдделла, море Амундсена и восточная часть Индоокеанского сектора). Наибольший рост фиксируется в верхнем слое 0 - 50 м, с максимумом в западной части Атлантического сектора Южного океана. Минимальные значения в этот период в верхнем слое отмечаются в центральной части Тихого и Индийского океанов.

Антарктической весной (октябрь - декабрь) максимальные интегральные значения Хл сосредоточены в зоне циклонического сдвига на южной периферии Антарктического Циркумполярного Течения. Наибольший рост фиксируется в слое 50 - 100 м, соответствующих нижней части подповерхностного пика Хл, что предположительно связано с вертикальным подъемом биогенных элементов в этой зоне.

Также показано, что в районах наибольшей концентрации Хл, его подповерхностный максимум находится ближе к поверхности, а в глубинных слоях Хл резко снижается. В центральной части океанов с относительно низкими значениями Хл в верхнем слое подповерхностный пик заглублен (50 - 70 м) и значения Хл в глубинных слоях выше. Здесь сезонный ход менее выражен и Хл более равномерно распределен по глубине.

Обработка массива измерений Био-Арго выполнена при поддержке Госзадания FNNN-2021-0010, исследование изменчивости вертикального распределения Хл при поддержке гранта РФФ 21-77-10059.

Список литературы

- 1) Бакуева Я. И., Кубрякова Е. А., Кубряков А. А. Особенности сезонной изменчивости концентрации хлорофилла а в различных регионах Южной Атлантики по спутниковым данным // Морской гидрофизический журнал. 2023. № 39(1). С. 31-51.
- 2) Демидов А.Б., Гагарин В.И., Григорьев А.В. Сезонная изменчивость хлорофилла "а" на поверхности в проливе Дрейка // Океанология. 2010. Т. 50. №. 3. С. 355-370.
- 3) Sallée J.B., Llorc J., Tagliabue A., Lévy M. Characterization of distinct bloom phenology regimes in the Southern Ocean // ICES Journal of Marine Science. 2015. Vol. 72. №. 6. P. 1985-1998. DOI:10.1093/icesjms/fsv069
- 4) Moore J.K., Abbott M.R. Surface chlorophyll concentrations in relation to the Antarctic Polar Front: seasonal and spatial patterns from satellite observations // Journal of Marine Systems. 2002. Vol. 37. №. 1-3. P. 69-86. DOI: 10.1016/S0924-7963(02)00196-3
- 5) Thomalla S.J., Fauchereau N., Swart S., Monteiro P.M.S. Regional scale characteristics of the seasonal cycle of chlorophyll in the Southern Ocean. // Biogeosciences. 2011. Vol. 8(10). P. 2849-2866. DOI:10.5194/bg-8-2849-2011
- 6) Чуринов Д.А., Гулюгин С.Ю. Сезонность вертикального распределения хлорофилла а в субширотных зонах Антарктической части Атлантики по данным прямых и дистанционных наблюдений // Труды ВНИРО. 2018. Т. 173. С. 92-105.

АНАЛИЗ ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В МЕСТАХ ПРОМЫСЛА СКУМБРИИ В 2020- 2022 ГОДАХ В ЮЖНО-КУРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА И СУДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Лебедева М.А.¹, Будянский М.В.², Белоненко Т.В.¹, Файман П.А.²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток

Ключевые слова: Японская скумбрия, промысел, океанологические условия, реанализ.

Японская скумбрия - пелагическая рыба, один из наиболее популярных объектов промысла в исключительной экономической зоне Российской Федерации. Адаптивные свойства годовых миграций массовых планктоноядных рыб зоны Субарктического фронта, к которым принадлежит и Японская скумбрия, проявляются в том, что все они размножаются в зоне течения Куроисио, а нагуливаются в более продуктивных субарктических водах. Скопления половозрелой Японской скумбрии из районов нереста и зимовки регулярно мигрируют к южным Курильским берегам, где рыба нагуливается, образуя наиболее плотные промысловые скопления в период с июля по ноябрь [1]. Протяжённость сезонных миграций рыб и положение промысловых скоплений определяется особенностями океанологической структуры исследуемого района, а также положением фронтальных зон [2]. Для возникновения промысловых скоплений рыб необходимо образование определённых благоприятных условий [3]. Если миграции в районы нагула (и промысла) определяются крупномасштабными гидрологическими циклами [2], то на распределение скоплений внутри района влияют локальные гидрологические явления, которые определяют распределение кормовых организмов, за которыми и следуют косяки рыб. Применяв технологию машинного обучения, авторы [5] установили, что для Японской скумбрии наиболее значимыми факторами являются поверхностные температура и солёность в местах промысла.

Южно-Курильский район, расположенный в Северо-Западной части Тихого океана, является одним из самых высокопродуктивных промысловых районов РФ, где ведётся промысел Японской скумбрии. На динамику района значительное влияние оказывает взаимодействие двух крупных течений: холодного Ойясио и тёплого Куроисио. Субарктические воды Ойясио представляют собой наиболее продуктивную зону, которая обычно расположена к северу от 41° с.ш. Однако в различные сезоны и годы южная граница этой зоны испытывает значительные смещения в пространстве, что выражается в проникновении на юг отдельных ветвей Ойясио. Отклоняясь к востоку около 40° с.ш., Куроисио начинает интенсивно меандрировать, а положение первого меандра влияет на распределение промысловых скоплений гидробионтов [2,4].

Целью настоящей работы является развитие новых методов анализа гидрологической обстановки в местах промысла Японской скумбрии, используя эйлеров и лагранжевы подходы. Основой исследования является информация о координатах расположения судов, осуществлявших промысел скумбрии в путины 2020-2022 гг., предоставленная ТИПРО (Тихоокеанским филиалом ВНИРО). Для построения лагранжевых карт использовались данные полей геострофических скоростей AVISO. Идея лагранжева подхода заключается в оперативной оценке относительного количества вод различного происхождения в местах промысла. Траектории пассивных маркеров, адвективируемых в поле скорости AVISO, позволяют выявить типичные транспортные коридоры (места наиболее вероятного переноса водных масс из одного региона в другой). Информация о распределении температуры и солёности в Южно-Курильском проливе получена из реанализа GLORYS12V1 (<http>

s://doi.org/10.48670/moi-00016).

В результате исследования получены следующие выводы:

1. Установлены значения температуры и солёности, являющиеся наиболее благоприятными для образования промысловых скоплений Японской скумбрии. Эти значения получены непосредственно в местах промысла и соответствуют реальным промысловым ситуациям 2020-2022 гг.
2. Показано, что в местах лова Японской скумбрии в Южно-Курильском проливе доминируют воды, поступившие в район через пролив Екатерины (начиная с июля), а также воды Ойясио (июнь-август), начиная с августа по ноябрь воды, проникающие через Кунаширский пролив и, по-прежнему, Екатерины. Влияние вод, поступавших через другие проливы Курильской гряды, на места промысла менее значительно.
3. Влияние вод разных проливов и Ойясио в целом на район отличается от такового для мест промысла. Однако общим и для мест промысла, и для района является большой процент содержания вод Ойясио.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, грант №23-17-00068

Список литературы

- 1) Черниенко Э.П., Черниенко И.С. Стандартизация уловов на усилии тихоокеанской скумбрии *Scomber japonicus* в прикурильских водах // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2022. Т.202. №.4. С.850-860.
- 2) Беляев В.А. Экосистема зоны течения Куроисио и ее динамика – Харабовск: Хабаровское книжное издательство, 2003. – 382 с.
- 3) Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 295 с.
- 4) Истоки Ойясио. Под ред. В.Р. Фукса, А.Н. Мичурина. Санкт-Петербург, 1997. – 248 с.
- 5) Kulik V., Baitaliuk A., Katugin O., Budyansky M., Uleysky M. New predictors for tracking the habitat of chub mackerel (*Scomber japonicus*) // NPFC-2023-TWG CMSA07-WP05. <https://www.npfc.int/new-predictors-tracking-habitat-chub-mackerel-scomber-japonicus>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНОСА РЕЧНЫХ ВОД СЕВЕРА ЮЖНОЙ АМЕРИКИ ЭКВАТОРИАЛЬНЫМ ПРОТИВОТЕЧЕНИЕМ АТЛАНТИКИ И СИСТЕМОЙ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ

Липинская Н.А., Салюк П.А., Будянский М.В., Холмогоров А.О.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

Ключевые слова: перенос воды, речные шлейфы, мезомасштабные вихри, лагранжес анализ, спутниковые данные, растворенный метан.

Речные шлейфы - это динамические структуры в океане, играющие важную роль во взаимодействии между океаном и сушей. Шлейфы, образующиеся у устьев крупных рек, могут распространяться на огромные площади в океане, достигая сотен тысяч квадратных километров.

Один из наиболее интересных районов Мирового океана с точки зрения исследования глобальной роли материкового стока представляют собой атлантические воды у побережья севера Южной Америки. Крупнейшие реки Южной Америки - Амазонка, Ориноко и Парана - вносят вклад в формирование этих вод.

Шлейфы, видимые на спутниковых снимках в видимом диапазоне, главным образом связаны с выносами Амазонки, которые стимулируют процесс цветения фитопланктона за счет распространения питательных веществ с помощью вихрей и апвеллингов. Кроме того, эти видимые шлейфы могут иметь прямое происхождение из реки, вынося взвешенные и растворенные органические вещества. Также, эти шлейфы могут служить "носителями" растворенного в морской воде метана. Метан может переноситься на значительные расстояния с течением реки, входящим в океан, и затем передвигаться струйными течениями. При этом метан концентрируется под нижней границей пикноклина, который является естественным термохалинным барьером, частично препятствующим вертикальной миграции CH_4 в поверхностный водный слой и атмосферу [1,2].

Во время научной экспедиции на исследовательском судне "Академик Борис Петров", рейс № 52, были получены данные о гидрологических показателях (температура, соленость), биооптических характеристиках (концентрация хлорофилла-а и окрашенного растворенного органического вещества) и газогеохимических показателях (концентрация растворенного метана в воде) в районе 11° с. ш. в ноябре (разрез 1) и декабре (разрез 2) 2022 года.

По спутниковым данным второго уровня, среднего пространственного разрешения со сканеров MODIS-Aqua/Terra, в полях концентрации хлорофилла-а, у устья Амазонки и Параны сезонно выделяется шлейф вод с повышенным содержанием фитопланктона, и распространяется в северном направлении.

Согласно спутниковым наблюдениям видимого диапазона, можно заметить, что Амазонский шлейф протекает вокруг Северо-Бразильского течения, которое находится на пятой параллели южной широты, и смещается в восточном направлении в извилистом северном экваториальном противотечении. [3], в районе проведения экспедиционных работ. На полученных экспедиционных данных также были выявлены мезомасштабные неоднородности гидрологических характеристик ($8-10^\circ$ с.ш.), которые могут быть связаны с распространением вод рек севера Южной Америки экваториальным противотечением и системой мезомасштабных вихрей. В подтверждение этого факта служат данные, полученные во время экспедиции о распределении растворенного метана в морской воде на разных глубинах. В основном, ниже границы пикноклина, концентрация растворенного метана в воде является высокой. Однако в ближнем придонном слое концентрация метана относительно низкая, что свидетельствует об отсутствии интенсивных источников метана на дне. Следовательно, в районе проведения экспедиционных работ отчетливо не наблюдаются признаки вертикальной миграции метана из придонных источников. Вероятно, метан был доставлен в область исследования течением, что подтверждается спутниковыми данными о цвете моря

и пространственным распределением гидрологических характеристик морской воды, связанными с плуями рек Амазонка и Парана.

Результаты численного моделирования подтверждают данные выводы. Было обнаружено, что пробы воды, взятые на станции в ноябре и декабре, имеют общее происхождение, совпадая в примерно одни и те же даты, где пересекаются плюм Амазонки и Параны. Однако на основе данных, полученных в ходе *in situ* измерений в районе экспедиционных работ, можно заметить некоторые различия между пробами воды, взятыми в разные месяцы. Например, воды, взятые в ноябре (на восточной части полигона, разрез 1), оказались более пресными, чем воды западной части полигона, взятые в декабре (разрез 2). Это может быть связано с перемешиванием с морской водой в результате более продолжительного переноса.

Комплексное исследование, которое включает оптические методы, дистанционное зондирование, газогеохимические методы, численное моделирование, а также данные натуральных наблюдений, предназначено для демонстрации того, что речные воды были включены в мезомасштабный вихрь, расположенный в северо-западной части экваториального противотечения. Это указывает на значительный вклад стока рек в стратификацию водных масс в субэкваториальной части Атлантического океана. Ранее считалось, что воды реки Амазонка распространяются на большие расстояния. Однако наше исследование показало, что распространение вод происходит не только через Амазонку, но также через реку Парана [4], которая находится южнее плуя Амазонки.

Работа выполнена в рамках госзадания ТОИ ДВО РАН № FWMM-2024-0032

Список литературы

- 1) Kholmogorov A., Syrbu N., Shakirov R. Influence of Hydrological Factors on the Distribution of Methane Fields in the Water Column of the Bransfield Strait: Cruise 87 of the R/V “Academik Mstislav Keldysh”, 7 December 2021–5 April 2022 //Water. 2022. V. 14. No. 20. P. 3311. <https://doi.org/10.3390/w14203311>
- 2) Morozov E.G., Frey D.I., Krechik V.A. et al. Multidisciplinary Observations across an Eddy Dipole in the Interaction Zone between Subtropical and Subantarctic Waters in the Southwest Atlantic //Water. 2022. V. 14. No. 17. P. 2701. <https://doi.org/10.3390/w14172701>
- 3) Muller-Karger F.E., Richardson P. L., McGillicuddy D. On the offshore dispersal of the Amazon’s Plume in the North Atlantic: Comments on the paper by A. Longhurst, “Seasonal cooling and blooming in tropical oceans” //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. 1995. V. 42. No. 11-12. P. 2127-2137. [https://doi.org/10.1016/0967-0637\(95\)00085-2](https://doi.org/10.1016/0967-0637(95)00085-2)
- 4) Morozov E.G., Zavialov P.O., Zamshin V.V., Moller Jr. O.O., Frey D.I., Zuev O.A., Seliverstova A.M., Bulanov A.V., Lipinskaya N.A., Salyuk P.A., Chvertkova O.I., Nemirovskaya I.A., Krechik V.A., and Chultsova A.L., Spreading of the Amazon River Plume // Russ. J. Earth. Sci. 2023. 23. P. ES4006. <https://doi.org/10.2205/2023es000863>

МОДЕЛИРОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОЙ МОДЕЛИ NEMO+BFM

Лишаев П.Н., Кубрякова Е.А., Кубряков А.А.

Морской гидрофизический институт РАН

Ключевые слова: численное моделирование, NEMO, BFM, Био-Арго, биогеохимия, кокколитофориды, хлорофилл "а", фитопланктон

В работе представлены результаты моделирования биохимических процессов на основе объединенной трехмерной модели NEMO-BFM для Черного моря за 2005-2015 гг. Модель BFM позволяет оценивать изменчивость элементов азотного, фосфорного и углеродного цикла. Модель BFM [1] в данной работе была адаптирована для Черного моря и объединена с ранее настроенной гидродинамической моделью NEMO [2] для этого региона с разрешением 10 км. Одной из особенностей Черного моря является наличие субкислородной зоны, для описания которой в модель были включены окислительно-восстановительные реакции с учетом кислорода, сероводорода, марганца [3]. Полученные результаты вертикального распределения и сезонной изменчивости основных биогенных элементов, кислорода, сероводорода согласуются с данными предыдущих исследований.

Используемая конфигурация включает расчет концентраций крупных и мелких диатомовых водорослей, кокколитофорид, которые определяют суммарную концентрацию хлорофилла "а" (Хл) в бассейне. Вертикальная изменчивость концентрации хлорофилла "а" по результатам расчетов имеет следующие особенности: весенний максимум в марте в слое 0-30 м, связанный с бурным развитием мелких диатомовых водорослей; летний подповерхностный максимум и рост Хл в верхнем слое в осенний период. В теплый период года, во время недостатка биогенов, а также под влиянием повышенной солнечной радиации, наблюдаются минимальные значения Хл в верхнем 15-метровом слое. Полученные по данным численного моделирования особенности пространственной и временной изменчивости концентрации хлорофилла "а" хорошо согласуются с натурными измерениями и данными буев Био-Арго.

В модели впервые были воспроизведены особенности пространственной изменчивости и вертикального распределения цветения кокколитофорид. Для этого была использована предложенная гипотеза причин летних цветений кокколитофорид. Согласно литературным данным, развитие кокколитофорид начинается в мае-июне в верхнем слое после весеннего цветения диатомовых водорослей. При этом возможной причиной развития кокколитофорид считается их способность потреблять растворенное органическое вещество (РОВ) – осмотрофию [4,5]. Под действием солнечной радиации в процессе фотодегградации РОВ в верхнем слое становится лабильным. В этот же период на клетках кокколитофорид образуется большое количество кокколит. Это способствует защите клетки от избыточной солнечной радиации в верхнем слое, где образуется лабильное РОВ. Добавленные в модель параметризации процессов осмотрофии кокколитофорид и фотодегградации РОВ позволили воспроизвести сезонную изменчивость кокколитофорид, характерную для центральной части Черного моря: развитие цветения с конца апреля по июль в верхнем 20-метровом слое, что согласуется с данными измерений буев Био-Арго. Рассчитанная пространственная изменчивость поверхностного распределения концентрации кокколитофорид с данными спутникового зондирования согласуются между собой. Летние цветения наиболее интенсивны в центральной части Черного моря, где поступление фосфатов из нутриклина в верхний слой наиболее активное, после максимума летнего цветения области с наивысшими значениями концентрации кокколитофорид смещаются в район континентального склона. Кроме этого, в модели удалось воспроизвести более слабое зимнее цветение кокколитофорид, что согласуется с данными Био-Арго.

Результаты моделирования позволили воспроизвести осеннее и весеннее цветения мелких диатомовых, и их глубинный максимум в нижних слоях фотической зоны в летний период. Данные моделирования также позволили описать особенности пространственной изменчивости фитопланктона в Черном море, в частности, доминирование крупных диатомовых на шельфе бассейна.

Результаты модели дают возможность воспроизводить существенную пространственную изменчивость химических и биологических веществ в Черном море, связанную с воздействием различных физических процессов – ветровым и конвективным перемешиванием, влиянием крупномасштабной и синоптической динамики вод, распространением речных плумов.

Настройка трехмерной биогеохимической модели ВФМ для Черного моря и валидация полученных модельных результатов выполнены при поддержке гос. темы FNNN-2021-0007 «Междисциплинарное численное моделирование и высокопроизводительные вычисления», восстановление сезонной изменчивости концентрации кокколитофорид по данным модели, исследование влияния вихревой динамики на пространственную и временную изменчивость фитопланктона, выполнено в рамках гранта № 23-17-00056.

Список литературы

- 1) Vichi M., Pinardi N., Masina S. A generalized model of pelagic biogeochemistry for the global ocean ecosystem. Part I: Theory //Journal of Marine Systems. Т. 64. №. 1-4. 2007. С. 89-109.
- 2) Мизюк А. И. и др. Долгопериодная изменчивость термохалинных характеристик Азовского моря на основе численной вихреразрешающей модели //Морской гидрофизический журнал. Т. 35. №. 5 (209). 2019. С. 496-510.
- 3) Kubryakova E. A., Korotaev G. K. Influence of vertical motions on maintaining the nitrate balance in the Black Sea based on numerical simulation //Oceanology. Т. 56. 2016. С. 25-35.
- 4) Benner I., Passow U. Utilization of organic nutrients by coccolithophores //Marine Ecology Progress Series. Т. 404. 2010. С. 21-29.
- 5) Godrijan J., Drapeau D., Balch W. M. Mixotrophic uptake of organic compounds by coccolithophores //Limnology and oceanography. Т. 65. №. 6. 2020. С. 1410-1421.

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ФЕНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕСЕННЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» МОРСКОГО ФИТОПЛАНКТОНА В МОРЯХ СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКОГО БАССЕЙНА

Мальшева А.С.^{1,2}, Лобанова П.В.¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

² Научный фонд «Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена», г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: весеннее «цветение», фитопланктон, фенологические параметры, Северный Ледовитый океан.

В морях Северо-Европейского бассейна Северного Ледовитого океана во время весеннего «цветения» – увеличения биомассы морского фитопланктона – происходит формирование большей части годовой первичной продукции [1]. «Цветение» характеризуется набором фенологических параметров: начало, продолжительность, интенсивность и величина. Данные характеристики имеют тенденцию меняться год от года, что сказывается на количестве органического вещества, поступающего на следующие трофические уровни. В связи с эффектом глобального потепления были зафиксированы более ранние даты начала «цветения» [1-3]. В Северном Ледовитом океане процессы потепления происходят более интенсивно, чем в среднем по Мировому океану, в связи с чем, начало весеннего «цветения» может сдвинуться до 50 дней [4].

Целью данного исследования являлась оценка фенологических параметров весеннего «цветения» морского фитопланктона, определяемых по концентрации хлорофилла-а (Хл-а), и их многолетней изменчивости в морях Северо-Европейского бассейна: Баренцево, Норвежское и Гренландское моря.

В исследовании были использованы 8-дневные данные концентрации Хл-а из базы объединенных данных модели GSM (Garver, Siegel, Maritorena Model) с пространственным разрешением 4 км и временным разрешением 8-дней, размещенные на веб-сайте Hermes GlobColour (<https://hermes.acri.fr/index.php>). Рассматривался период с 1998 по 2022 год, ежегодно с марта по июль.

В данной работе весеннее «цветение» (ВЦ) фитопланктона определялось как заметное повышение концентрации Хл-а, заключенное в отдельные начальные и конечные точки временных рядов, определенные с помощью алгоритма последовательного усреднения Sequential T-test Analysis of Regime Shifts (STARS) [5], основанного на последовательном анализе t-критерия Стьюдента. Данная функция была использована при расчете фенологических характеристик в Matlab R2022b: дата начала «цветения» – день года, в который было обнаружено «цветение». Промежуток времени между положительной и отрицательной точками смены режима (смены средних значений во временном ряду) записывался как продолжительность ВЦ в днях. Интенсивность ВЦ – среднее значение концентрации Хл-а за весь период «цветения», (мг/м^3). Величина ВЦ – суммарная концентрация Хл-а во время «цветения», (мг/м^3).

В Баренцевом море весеннее «цветение» фитопланктона начиналось раньше всего из рассматриваемых морей – 24 апреля (в среднем по морю за период 1998-2022 гг.), со средней продолжительностью равной 61 дню. Самые интенсивные ВЦ (более 5 мг/м^3) были отмечены в центральной части, к северу от Новой Земли и в прибрежной части Печорского моря. Чаще всего ВЦ наблюдалось в юго-восточной части к северу от Кольского п-ова.

В Норвежском море дата начала ВЦ в среднем за 25 лет – 29 апреля, со средней продолжительностью 66 дней. Раньше всего ВЦ наступает вдоль береговой линии Скандинавского полуострова, где наблюдаются наибольшие концентрации Хл-а по интенсивности и величине ВЦ (более 3 мг/м^3 и 20 мг/м^3 , соответственно). Для более поздних ВЦ были характерны минимальные интенсив-

ность и величина ($< 1,5 \text{ мг/м}^3$ и $< 10 \text{ мг/м}^3$ соответственно). В Норвежское море отмечались наименьшие концентрации Хл-а из трех рассматриваемых морей.

В Гренландском море срок начала ВЦ наиболее поздний – 8 мая, со средней продолжительностью 61 день. В прибрежных областях ВЦ начиналось раньше. Максимальные значения интенсивности и величины ВЦ (более 4 мг/м^3 и 20 мг/м^3 , соответственно) приходились на фронтальную зону от Исландии до Шпицбергена, где происходит взаимодействие холодного Восточно-Гренландского течения с ветвями Норвежского и Западно-Шпицбергенского течения [6]. Минимальные концентрации Хл-а как в среднем (менее 2 мг/м^3), так и за весь период ВЦ (менее 10 мг/м^3) отмечались к востоку и западу от полярного фронта.

Для морей Северо-Европейского бассейна были проанализированы осредненные по широтам и долготам фенологические параметры ВЦ: с 1998 по 2022 г. в сроках начала весеннего «цветения» были значимые положительные тренды в Норвежском и Гренландском морях – сдвиг даты на 6 дней позже. При этом, в Норвежском море уменьшилась интенсивность «цветения» (тренд -8%), а в Гренландском море величина «цветения», наоборот, возросла ($+7\%$). Для Баренцева моря ни по одному из рассматриваемых параметров не было обнаружено значимых трендов за 25-летний период. Однако, в данном море незначимый отрицательный тренд указывает на смещении даты начала ВЦ на несколько дней раньше.

В дальнейшей работе планируется анализ полученных результатов и поиск связи межгодовой изменчивости фенологических параметров с абиотическими параметрами среды.

-

Список литературы

- 1) Qu B., Gabric A.J., Matrai P.A. The satellite-derived distribution of chlorophyll-a and its relation to ice cover, radiation and sea surface temperature in the Barents Sea // *Polar Biol.* 2006. Т. 29. № 3. С. 196–210.
- 2) D’Ortenzio F., Antoine D., Martinez E., Ribera d’Alcalà M. Phenological changes of oceanic phytoplankton in the 1980s and 2000s as revealed by remotely sensed ocean-color observations // *Glob. Biogeochem. Cycles.* 2012. Т. 26. № 4. С. 2011GB004269. doi:10.1029/2011GB004269.
- 3) Friedland K.D., Mouw C.B., Asch R.G., Ferreira A.S.A., Henson S., Hyde K.J.W., Morse R.E., Thomas A.C., Brady D.C. Phenology and time series trends of the dominant seasonal phytoplankton bloom across global scales // *Glob. Ecol. Biogeogr.* 2018. Т. 27. № 5. С. 551–569.
- 4) Kahru M., Elmgren R. Satellite detection of multi-decadal time series of cyanobacteria accumulations in the Baltic Sea. : *Biogeochemistry: Bio-Optics*, 2014.
- 5) Rodionov S.N. A sequential algorithm for testing climate regime shifts: ALGORITHM FOR TESTING REGIME SHIFTS // *Geophys. Res. Lett.* 2004. Т. 31. № 9. С. n/a-n/a.
- 6) Oziel L., Baudena A., Ardyna M., Massicotte P., Randelhoff A., Sallée J.-B., Ingvaldsen R.B., Devred E., Babin M. Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean. *Nature Communications.* 2020. V. 11(1). P. 1705. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15485-5>

МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЗОНЕ ПРОМЫСЛА У ПОБЕРЕЖЬЯ МАРОККО В 2016-2021 ГГ

Мищенко А.С.

Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: рыболовная зона Марокко, промысел, Канарский апвеллинг, океанографические условия среды, улов на усилие.

Одним из направлений исследования Мирового океана является промысловая океанология. Особый интерес представляют районы интенсивного промысла, приуроченные к зонам апвеллинга. В частности, район атлантической рыболовной зоны (АРЗ) Марокко в северной части Канарского апвеллинга. АРЗ характеризуется сложной термохалинной структурой и динамикой водных масс [1]. Особенно важной является южная часть АРЗ между 21–31° с.ш.

В рамках данной работы выявляются особенности межгодовой изменчивости океанографических условий в зоне промысла у побережья Марокко в период с 2016 по 2021 гг. с использованием методов статистического анализа.

Основными материалами послужили данные об уловах Российской Федерации в зоне промысла у побережья Марокко, предоставленные АтлантНИРО, а также значения натуральных наблюдений гидрологических и гидрохимических характеристик, дополненные из базы данных Copernicus.

При обработке промысловых рядов общий вылов не может являться единственным критерием для определения численности рыб в регионе. Наиболее используемыми параметрами промысла являются промысловое усилие, промысловая эффективность (на практике используется термин «улов на усилие»), промысловая нагрузка [2]. Поэтому, для более корректной оценки численности рыбных запасов необходимо перейти к оценке улова на усилие, где учтено количество судов, осуществлявших промысел в конкретный период.

Результаты тренд-анализа рядов гидрологических и гидрохимических характеристик хорошо отражают общую тенденцию изменения данных параметров, благодаря чему можно наглядно представить динамику их развития и получить соответствующие оценки временного ряда. Значимые линейные тренды были характерны в 2016–2021 гг. для солености и минерального фосфора. Соответственно, для температуры поверхности океана и растворенного кислорода линейные тренды незначимы.

Для оценки влияния гидрологических характеристик на изменение промысла на основании кластерного анализа выявлено пять основных типов, определяемых пространственное распределение температуры поверхности океана и солености за период с 2016 по 2021 гг., для них получены типовые распределения гидрохимических характеристик.

Статистический анализ данных показал, что за последние 6 лет температура поверхности океана увеличилась., при этом значения кластеров значимо различаются. Особенно заметны отличия между их средними значениями и стандартным отклонением, что позволяет судить о принадлежности к определенному кластеру. Для первого и второго кластера характерны самые высокие значения температур (22.76°C и 21.93°C соответственно), для третьего и пятого – самые низкие (19.69°C и 19.89°C соответственно) и четвертый имеет значение 20.56°C. Оценка достоверности различий по солености показала, что она не является определяющим фактором формирования данной зоны, поэтому в данном исследовании можно ограничиться данными по температуре поверхности океана.

В прибрежной зоне в основном находятся воды апвеллинга, которые берут свое начало от 21° с.ш. Именно в этой узкой полосе располагаются основные районы промысла, что подтверждается расположением судов в 2016- 2021 годах. Наилучшие результаты промыслового усилия соответствуют первому кластеру, в котором наблюдаются самые высокие значения температуры воды и

начинают локализоваться два очага: у южной части побережья и у северо-восточной части побережья Марокко. Когда апвеллинг начинает проявляться более интенсивно, то за счет размытости характеристик промысловое усилие оказывается намного менее эффективным.

Содержание растворенного кислорода и минерального фосфора на исследуемой акватории хорошо коррелировало с их термохалинными характеристиками. В очагах активного апвеллинга отмечались минимумы содержания кислорода. Зона максимальных концентраций минерального фосфора расположена на юге побережья там, где находится очаг Канарского апвеллинга, благодаря которому с холодными водами поступают фосфаты.

В рассматриваемой зоне промысла имеют место существенные изменения океанографических условий в течение нескольких лет. Чередование типовых гидрологических и гидрохимических условий в очагах апвеллинга в течение года значительно нарушаются, особенно с 2019 года. При этом зафиксированы самые низкие уловы на усилие за исследованный период. Значения температуры поверхности океана в двух разных очагах апвеллинга ведут себя абсолютно синхронно, также как и растворенный кислород, но с 2019 года происходит уменьшение внутригодовой амплитуды изменения содержания кислорода. У солености с этого же года происходит существенный сдвиг по фазе. Распределение минерального фосфора в очагах апвеллинга крайне неоднородно. Здесь присутствует ярко выраженная разнонаправленная тенденция в распределении значений. С 2019 года прослеживается существенное снижение концентрации минерального фосфора в очаге апвеллинга в юго-западной части исследуемой зоны промысла и его увеличение в северо-восточной части. Раньше таких изменений в данном регионе не было зафиксировано. Поэтому данной разнонаправленности тенденций в очагах апвеллинга необходимо уделить особое внимание.

Нет

Список литературы

- 1) Бурькин С.Н., Краснобородько О.Ю., Морозов А.А. Особенности океанологических условий в водах Марокко в осенний сезон 2019 года // Труды АтлантНИРО. 2020. Том 4. № 2. С. 30-42.
- 2) Стафикопуло А.М., Горбатюк Я.И. Промысловая нагрузка судов различной мощности при траловом промысле хамсы в Азово-Черноморском бассейне в 2017 г. // Водные биоресурсы и среда обитания. 2018. Том 1. № 2. С. 51-69.

БИООПТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ВОД СРЕДНЕЙ ВОЛГИ

Мольков А.А.^{1,2}, Капустин И.А.^{1,2}, Ермошкин А.В.^{1,2}, Лещев Г.В.^{1,2}, Доброхотова Д.В.^{1,2},
Кольцова Е.С.¹, Коновалов Б.В.^{1,3}, Дроздова А.Н.^{1,3}, Пелевин В.В.³, Кириллов А.Г.²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, Нижний Новгород

² Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

³ Институт океанологии им. П.П. Ширинова РАН, Москва

Ключевые слова: дистанционное зондирование, цвет воды, коэффициент яркости воды, биооптические алгоритмы, биооптические модели, средняя Волга, Куйбышевское водохранилище, лидар УФЛ-9.

На основе данных подспутниковых измерений на Куйбышевском водохранилище предложены предварительные биооптические модели для сканера цвета высокого разрешения Sentinel-2/MSI. Основной трудностью оказалось сильно неоднородное пространственное распределение оптических свойств воды, на формирование которого прежде всего влияют особенности гидрологии исследуемой акватории (смещение существенно различных вод Волги и Камы, сложная батиметрия, переменный уровень воды, наличие протяженных мелководных пойм) и метеорологические условия. Вследствие этого встречаются участки как относительно чистой воды, так и воды, оптические свойства которых определяются одновременным высоким содержанием фитопланктона, минеральной и органической взвеси. Стандартные биооптические алгоритмы, полученные для океанских вод, в оптически сложных водах внутренних водоемов работают плохо (см., например, [1]). Это связано, главным образом, с тем, что гипотеза о пренебрежимо малой величине восходящего из воды излучения в инфракрасной области электромагнитного спектра здесь не выполняется. Попытки оценить эту величину только по спутниковому снимку без привлечения дополнительных данных далеко не всегда успешны, что приводит к неправильной оценке вклада аэрозольной составляющей и, как результат, коэффициента яркости воды. Поэтому, принимая во внимание, что оптические свойства и состав вод внутренних водоемов уникальны, многие исследователи придерживаются подхода разработки отдельных региональных алгоритмов для каждого водоема. Попытки создать глобальную базу по внутренним водоемам показали, что хорошо работающие алгоритмы для одного водоема неодинаково хорошо работают для остальных, а создание общего алгоритма не дало значимых результатов. Возможное развитие в создании общих алгоритмов для оптически сложных вод лежит в кластеризации водоемов по оптическим типам (формам спектров яркости восходящего излучения) и создании алгоритмов для каждого кластера. В своем исследовании мы сочетали оба подхода: разработали региональные модели для Куйбышевского водохранилища и показали для каких оптических типов вод они получены. Благодаря уникальному комплексу измерительных приборов и методике измерения гидрооптических характеристик воды с борта движущегося судна за несколько экспедиционных дней удалось собрать большой набор данных в различных районах Куйбышевского водохранилища. При этом судовые разрезы проходили через сильно отличающиеся по своим свойствам воды: с относительно низким содержанием взвеси (2-3 мг/л) и хлорофилла "а" (до 10 мг/м³); с высоким содержанием взвеси (до 10 мг/л); с высокой концентрацией хлорофилла "а" (несколько десятков мг/м³); высокопродуктивные воды с экстремальным цветением водорослей (концентрации хлорофилла "а" до 220 мг/м³). Соответствующие спутниковые изображения обработаны помощью алгоритма атмосферной коррекции ACOLITE, обеспечивающего наивысшую точность восстановления коэффициентов яркости среди других доступных алгоритмов. Отбор соответствующих пар измерения-спутник включал в себя следующие этапы: наложение измерений на спутниковый снимок; осреднение всех измерений, попавших в один пиксель снимка; фильтрация выбросов и при необходимости сглаживание временных рядов измерений. В результате было отобрано более 1306 пар данных для разработки модели для оценки

концентрации хлорофилла “а” и 2587 пар – для концентрации взвешенного вещества. На основе этих данных были выделены кластеры оптических типов вод, в которых наблюдалось устойчивая зависимость спутниковых коэффициентов яркости с измеренными концентрациями хлорофилла “а” и взвешенного вещества. Для разработки оптимальных биооптических моделей были проанализированы различные формы зависимостей концентраций оптически активных компонент от различных независимых переменных (коэффициентов яркости воды на одном спектральном канале или комбинации каналов). В результате были получены предварительные региональные биооптические алгоритмы для оценки концентрации хлорофилла “а” и взвешенного вещества по данным снимков Sentinel-2 для Куйбышевского водохранилища. Ранее для этого водоема алгоритмы не строились, а предложенные в этом проекте алгоритмы верифицированы на большой статистической выборке.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-17-00071

Список литературы

- 1) Ansper A., Alikas K. Retrieval of Chlorophyll a from Sentinel-2 MSI Data for the European Union Water Framework Directive Reporting Purposes // Remote Sensing. №11(1). 2019. С.64.

БИООПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОД КАРСКОГО МОРЯ В ОКТЯБРЕ-НОЯБРЕ 2023 Г.

Павлова М.А.^{1,2}, Глуховец Д.И.^{1,2}, Дерягин Д.Н.^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

² Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный

Ключевые слова: коэффициент яркости моря, показатель поглощения желтым веществом, показатель ослабления света морской водой, интенсивность флуоресценции ОРОВ, Карское море, GIOP

Исследование акватории Карского моря является актуальной задачей в период климатических изменений, а также активного влияния антропогенных факторов на состояние экосистемы Арктического региона. Проведение гидрооптических работ позволяет получать информацию о распространении света в водной толще, которая может быть использована при решении задач мониторинга морской среды.

География исследований, проведенных в 92-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», охватила заливы Новой Земли, Новоземельскую впадину, Байдарацкую и Обскую губу, желоба Святой Анны и Воронина, центральную часть Карского моря. Важно, что коэффициент яркости моря $R_{rs}(\lambda)$, показатель поглощения желтым веществом $a_g(443)$, показатель ослабления света морской водой $c(530)$, интенсивность флуоресценции окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) Flu зарегистрированы в предзимний сезон, что являлось относительной редкостью предыдущих экспедиций, проводимых в конце лета - начале осени.

Измеренные с помощью палубного спектрорадиометра [1] $R_{rs}(\lambda)$ характеризуются многообразием соотношений гидрооптических параметров морской воды Карского моря. Например, коэффициент яркости моря, полученный в Обском эстуарии, имеет наклон коротковолновом диапазоне, обусловленный значительным содержанием ОРОВ. Также сопоставление результатов измерений интегрирующей сферы в конфигурации ICAM [2] $a_g(530)$ с данными о $c(530)$, полученными с помощью автономного зондирующего прозрачномера ПУМ-200 [3], показало, что выделяются две линейные зависимости. Чтобы обоснованно разделить все измерения на две группы, были рассчитаны вероятности выживания фотона $\omega(530)$. За условную границу принято значение $\omega(530)=0.9$. При $\omega(530)>0.9$ данные соответствуют измерениям, проведенным преимущественно в Обском эстуарии, при $\omega(530)<0.9$ – в открытых частях Карского моря.

Дополнительно на основе данных $R_{rs}(\lambda)$ рассчитан показатель поглощения желтым веществом и детритом $a_{dg}(443)$ с помощью биооптической модели GIOP [4]. Сравнение значений $a_{dg}(443)$ с данными о $a_g(443)$ в поверхностном слое, подтвердило хорошее соответствие как в предзимний сезон 2023 г. ($R^2 = 0.98$), так и в осенний сезон 2022 г. ($R^2 = 0.82$) [5]. Стоит отметить, что пар значений « $a_g(443)$ - $a_{dg}(443)$ » в 2023 г. значительно меньше ($N = 6$), чем в 2022 г. ($N = 21$). Это связано с неблагоприятными условиями освещения, в частности, с меньшей продолжительностью светового дня и низким положением Солнца над горизонтом.

Измерения показателя поглощения желтым веществом и интенсивности флуоресценции ОРОВ проводились на пробах морской воды, отобранных и с поверхности, и с горизонтов. Сравнение Flu с $a_g(443)$ показало хорошее согласие ($R^2 = 0.86$), что говорит о возможности использования данных об интенсивности флуоресценции ОРОВ, полученных в Карском море, для восстановления значений показателя поглощения желтым веществом.

Получаем, что в неблагоприятных условиях освещения палубный спектрорадиометр позволяет зарегистрировать спектры коэффициента яркости моря, по которым рассчитывается хорошо согласующийся с результатами прямых измерений показатель поглощения желтым веществом и детритом. Помимо этого, сравнение показателя ослабления света морской водой с показателем

поглощения ОРОВ демонстрирует различные соотношения первичных гидрооптических характеристик, что может быть использовано в дальнейшем усовершенствовании региональных спутниковых алгоритмов ИО РАН. Возможность выражения показателя поглощения желтым веществом через интенсивность флуоресценции ОРОВ позволит рассчитывать эту характеристику, например, по данным проточного комплекса [6] об интенсивности флуоресценции ОРОВ, что полезно для определения границ распространения речного стока.

Авторы благодарят П. А. Бородулину, А.В. Григорьева и В.Р. Таскаева за помощь в проведении гидрооптических измерений и Ю.А. Гольдина за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФ №21-77-10059.

Список литературы

- 1) Павлова М.А., Глуховец Д.И., Володин В.Д. Палубный спектро радиометр для измерения коэффициента яркости моря // *Океанология*. 2023 (в печати).
- 2) Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В. Чивкунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // *Океанология*. 2009. Т. 49. № 6. С. 934–939.
- 3) Артемьев В.А., Таскаев В.Р., Григорьев А.В. Автономный прозрачномер ПУМ-200. Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ 2021), Москва 2021, материалы конференции, том I Май 2021, с. 95-99.
- 4) Werdell P.J., Franz B.A., Bailey S.W., Feldman G.C., Boss E., Brando V.E., Mangin A. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties // *Applied optics*. 2013. V. 52. № 10. P. 2019–2037.
- 5) Павлова М.А., Глуховец Д.И. Анализ данных о коэффициенте яркости моря и биооптических характеристиках, измеренных контактными и дистанционными методами в Карском море осенью 2022 г. // *Комплексные исследования Мирового океана: Материалы VII Всероссийской научной конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 15–19 мая 2023 года.* – Санкт-Петербург: Свое издательство, 2023. – С. 497–498.
- 6) Гольдин Ю.А., Глуховец Д.И., Гуреев Б.А., Григорьев А.В., Артемьев В.А. Судовой проточный комплекс для измерения биооптических и гидрологических характеристик морской воды // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 814–822.

СУТОЧНОЕ ВЕРТИКАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЙ САРДИНЫ И ЯПОНСКОЙ СКУМБРИИ

Поляничко В.И., Панфилов Д.М.

Тихоокеанский филиал федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»

Ключевые слова: сардина, скумбрия, вертикальное распределение, миграции, научный эхолот, гидроакустический метод

Суточные вертикальные миграции являются важнейшей чертой биологии многих морских, пресноводных и проходных рыб и других водных животных. Они различаются по своей протяженности, направлению и формам проявления. Подъем водных организмов к поверхности ночью и опускание их на глубину в дневные часы считается типичной суточной вертикальной миграцией [1].

В 2014 г., в ходе проведения научно-исследовательских работ по оценке состояния запасов водных биоресурсов в прикурильских водах СЗТО (северо-западная часть Тихого океана) судами ТИНРО оснащёнными научной гидроакустической аппаратурой были обнаружены значительные скопления субтропических видов – дальневосточной сардины (*Sardinops melanostictus*) и японской скумбрии (*Scomber japonicus*). Исследования в 2015-2018 гг. показали дальнейший рост численности сардины и скумбрии в СЗТО, что инициировало возобновление их массового промысла. В связи с этим регулярный мониторинг масштабов распространения, изучение поведения и вертикальной структуры нагульных скоплений сардины и скумбрии становится особенно актуальным.

Целью данной работы являлось исследование характеристик суточного вертикального распределения дальневосточной сардины и японской скумбрии в СЗТО.

В качестве основного инструмента исследований использовался научный эхолот EK60 Simrad с размещенными под килем судна вертикально направленными антеннами с расщепленным лучом частотой 38 и 120 кГц. Основой технологии гидроакустической оценки запасов является измерение силы обратного поверхностного рассеяния от скопления гидробионтов в пределах выбранного слоя и расчёт их численности по известной отражательной способности (силе цели) рыб. Регистрация гидроакустических данных производилась круглосуточно с использованием программы ER60 в формате RAW Simrad. Обработка накопленных файлов эхограмм проводилась с использованием программного обеспечения SALTSE [2].

Скумбрия и сардина по своему поведению стайные подвижные рыбы. Они способны в течение сумерек рассеиваться и на рассвете быстро собираться в плотные косяки, которые могут развивать большие скорости перемещения. Устойчивость отдельных скоплений обычно не превышает 1-3 суток и тесно связана с изменчивостью распределения кормовых организмов, которая, в свою очередь, находится в зависимости от гидрологических условий. Обитают в приповерхностных горизонтах (преимущественно на глубинах до 30 м), не совершают существенных вертикальных миграций в течение суток и в последние годы регистрируются преимущественно в виде смешанных скоплений.

В 2021 г. японская скумбрия в дневное время образовывала мелкие подвижные косяки высокой плотности высотой 3-12 м и горизонтальной протяженностью 10-45 м. Рассчитанная эхоинтеграционным методом биомасса зарегистрированных косячков скумбрии варьировала от 6 до 70 тонн (в среднем 18 тонн). Косяки дальневосточной сардины в дневное время тоже плотные, обитали в тех же горизонтах, что и скумбрия, но имели большее вертикальное развитие 8-24 м и горизонтальную протяженность 20-100 м. Биомасса дневных косячков сардины варьирует от 8 до 120 тонн (средняя 32 тонны). В темное время суток, косячки скумбрии рассеивались до дисперсных слоев в

виде сплошных лент (часто в форме «коленвал») или прерывистых скоплений переменной плотности выше или в слое термоклина. Сардина, как правило, сохраняла косячное состояние стай, но при этом, структура косяков становилась более рыхлой и увеличивалась их горизонтальная протяженность (до 700 м).

Диапазон вертикальных перемещений сардины и скумбрии, как и других стайных пелагических рыб в СЗТО, ограничен пределами верхнего термически квазиоднородного слоя (ВКС). Выше 95 % численности этих рыб в периоды съёмок 2015-2020 гг. было зарегистрировано в пределах слоя до 30 м. При этом суточные вертикальные миграции к поверхности в тёмное время суток отсутствовали. Отмечалась даже некоторая обратная тенденция смещения центра концентрации в более глубокие горизонты ночью, связанная с рассеянием рыб.

Наблюдения за ряд лет показали, что наибольшая суточная изменчивость в вертикальном распределении скумбрии. Центр концентрации скоплений ночью был на 0,4-5,7 м ниже, чем днем. Смещения центров концентрации сардины в течение суток были выражены слабее: от 0,3 до 2,9 м в разные годы.

Летом 2021 г. наблюдалась отличное от предыдущих лет вертикальное распределение сардины и скумбрии. Наметилось смещение с наступлением ночи части особей ближе к поверхности. Т.е. суточные вертикальные перемещения подчинялись типичному образу поведения мигрирующих рыб. В светлое время суток ядро скоплений скумбрии было расположено в пределах слоя 11-18 м (59 % численности). Средневзвешенная глубина обитания составляла 19,8 м. В темное время 95 % численности скумбрии было учтено в диапазоне глубин 10-20 м с центром концентрации на глубине 15,3 м.

У сардины ядро скоплений днем находилось несколько ниже, чем у скумбрии - в пределах слоя 19-29 м, где было зарегистрировано 66 % численности этих рыб. Средневзвешенная глубина - 24 м. Ночью центр концентрации сардины смещался ближе к поверхности (средневзвешенная глубина 20,5 м) и несколько расширялся за счет рассеяния рыб. Диапазон суточных вертикальных миграций в июне-июле 2021 г. составил 4,5 м у скумбрии и 3,5 м у сардины. Осенью 2021 г. суточные вертикальные перемещения сардины и скумбрии отсутствовали. Днем ядро скоплений находилось в пределах слоя 12-15 м. В темное время суток, как и в предыдущие годы, центр концентрации скоплений за счет рассеяния рыб смещался в более глубокие горизонты: на 2,3 м у скумбрии, и на 2,8 м у сардины.

Полученные результаты о суточном вертикальном распределении дальневосточной сардины и японской скумбрии предоставляют ценные данные для более глубокого понимания поведения этих субтропических видов рыб в СЗТО, что имеет важное значение для управления рыбными ресурсами в данном регионе.

Финансирование не предусмотрено.

Список литературы

- 1) Зуссер Г. Суточные вертикальные миграции морских планктоноядных рыб. - М.: Пищевая пром-ть, 1971. - 224 с.
- 2) Кузнецов М.Ю., Убарчук И.А., Поляничко В.И., Сыроваткин Е.В. Программный комплекс для визуализации, многовидовой обработки и хранения данных гидроакустических ресурсных съёмов // Труды ВНИРО. - 2021. - Т. 183. - С. 174-190.

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПО ИХ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫМ ПАРАМЕТРАМ

Попик А.Ю.

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН

Ключевые слова: красные приливы, вредоносные «цветения» водорослей, лазерно-индуцированная флуоресценция, температурные кривые флуоресценции.

Одноклеточные микроводоросли заселяющие верхние слои вод Мирового океана одновременно могут являться и индикаторами экологического благополучия, и источником экологических катастроф. Для Дальнего востока, как и для страны в целом еще памятно цветение микроводорослей 2020 года в акватории Камчатского полуострова, которое возможно и не носило такого катастрофического характера, как цветения чилийских, американских, скандинавских или японских водах, но получило обширную огласку и резонанс [1].

Возможность предотвращения экологических катастроф, связанных с цветением микроводорослей обусловлена своевременным их обнаружением, что сложно сделать, учитывая площади акваторий, их объемы, и влияние таких факторов, как внутренние волны, ветра, осадки, изменение температуры и т.д. Длительный или непрерывный мониторинг целевых объектов, таких как рыбные фермы, зоны отдыха, пляжи и т.п. должен являться первым шагом в развитии эффективной борьбы с вредными цветениями. В качестве методов, которые можно успешно задействовать в таком мониторинге необходимо использовать те, которые не только позволяют надежно отслеживать изменение концентрации микроводорослей в воде, но также и позволять идентифицировать эти микроводоросли, и делать это в автоматическом режиме.

Оптические методы, позволяющие измерять, поляризацию или цвет поверхности моря, интенсивность и спектры флуоресценции микроводорослей широко применяются в средствах мониторинга. На их основе можно создавать измерительные системы различной конфигурации: погружные, прокачиваемые, дистанционные [2], [3], [4]. В таких системах удобно осуществлять автоматизацию как процессов измерения, так и обработки данных, что увеличивает точность, облегчает работу и ускоряет процесс принятия решений.

Мы показали возможность получения флуоресцентных параметров микроводорослей в качестве признаков, характерных для родов и некоторых видов микроводорослей, при помощи которых можно осуществлять их идентификацию [5], [6]. В нашей работе в качестве таких признаков используются зависимости спектров лазерно-индуцированной флуоресценции микроводорослей от температуры. Изверения проводятся на лабораторной установке с лазером Melles Griot (445 нм), спектрометром Andor (камера Newton EmCCD) и терморегулируемой камерой. Важным пунктом является непрерывное изменение температуры от естественной, до критической, при которой микроводоросли погибают. Благодаря экстремальному нагреву, измеряемые в ходе этого нагрева спектры флуоресценции позволяют оценить не только количество и эффективную работу хлорофилла-а, но так же и изменения, которые будут происходить в пигмент-белковых комплексах микроводорослей и их окружении, таким образом косвенно отражая разную биохимическую структуру изучаемых организмов [5].

Нами подобраны такие флуоресцентные параметры, которые позволяют сравнивать микроводоросли между собой [6]. Во-первых, температурные спектры флуоресценции (ТСФ), которые представляют собой трехмерные поверхности, образованные упорядоченным массивом спектров, измеренных при возрастающей температуре, во-вторых, зависимость интенсивности максимальной флуоресценции хлорофилла-а от температуры, которую мы называем температурными кривыми флуоресценции (ТКФ), в-третьих, зависимость длины волны максимума флуоресценции

хлорофилла-а от температуры, которую мы называем волновыми температурными кривыми флуоресценции (ВТКФ). Кроме этих трех измеряемых параметров мы также можем использовать дополнительные, которые получаются благодаря математической обработке: нормированию, интегрированию или дифференцированию полученных ТКФ.

Нами предложена методика идентификации, основанная на сравнении измеренных эталонных флуоресцентных параметров исследуемых образцов с эталонными. Эталонные флуоресцентные параметры мы получаем, исследуя чистые монокультуры микроводорослей из имеющихся доступных коллекций. На данный момент нами получены эталонные флуоресцентные характеристики, которые с достаточной точностью позволяют идентифицировать монокультуры микроводорослей в исследуемых лабораторных образцах на уровне рода [6]. Это дает нам права предположить, что дальнейшее развитие аппарата анализа этих флуоресцентных параметров открывает для нас перспективу использования оптических методов, для идентификации микроводорослей и в природной воде. Важным аспектом, подтверждающим возможность такого анализа, является тот факт, что при начале цветений микроводорослей сильно возрастает концентрация конкретной «культуры» приближая образцы естественной воды по их флуоресценции к образцам монокультур. На данном этапе работы мы собрали коллекцию эталонных параметров от более чем 30 видов микроводорослей, в том числе и потенциально токсичных, вызывающих вредоносные цветения и красные приливы.

Работа, связанная с изучением флуоресцентных параметров и созданием методики оптической идентификации микроводорослей на их основе выполнялась при поддержке Российского научного фонда на средства гранта РФФИ № 23-77-00004. Монокультуры микроводорослей для получения эталонных характеристик были предоставлены Биобанком ННЦМБ ДВО РАН.

Список литературы

- 1) Orlova T.Y. et al. A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // *Harmful Algae*. - 2022. - Vol. 120. - P. 102337.
- 2) Voznesenskiy S.S. et al. A fiber-optic fluorometer for measuring phytoplankton photosynthesis parameters // *Instruments and Experimental Techniques*. - 2014. - Vol. 57. - № 3. - pp. 330–335.
- 3) Markina Z. V. Flow Cytometry as a Method to Study Marine Unicellular Algae: Development, Problems, and Prospects // *Russian Journal of Marine Biology*. - 2019. - Vol. 45. - № 5. - pp. 333–340.
- 4) Alexanin A. et al. Methodology and Results of Satellite Monitoring of *Karenia* Microalgae Blooms, That Caused the Ecological Disaster off Kamchatka Peninsula // *Remote Sensing*. - 2023. - Vol. 15. - № 5. - P. 1197.
- 5) Voznesenskiy S.S. et al. Temperature dependence of the parameters of laser-induced fluorescence and species composition of phytoplankton [U+202F]: The theory and the experiments // *Algal Research*. - 2019. - Vol. 44. - P. 101719.
- 6) Попик А.Ю., Гамаюнов Е.Л., Вознесенский С.С. Автоматизированная система анализа флуоресцентных характеристик культур микроводорослей // *Оптика атмосферы и океана*. - 2023. - Vol. 12. - № 36. - pp. 1020–1026.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И БИООПТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА БИОМАССУ ЗООПЛАНКТОНА В ЮЖНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Юшманова А.В., Шатравин А.В., Анохина Л.Л.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: хлорофилл «а», биомасса зоопланктона, MODIS AQUA, буи Био-Арго, Атлантический океан

Биологическая продуктивность вод является одним из ключевых факторов, определяющих временное и пространственное распределение биомассы зоопланктона в океане. Примечательно, что для некоторых регионов биомасса определенных групп видов зоопланктона с удовлетворительной точностью аппроксимируется моделями, использующими в качестве объясняющих переменных исключительно спутниковые данные о температуре и концентрации хлорофилла в тонком поверхностном слое [1, 2]. При этом критическое значение для состоятельности таких моделей имеют параметры временных и пространственных окон осреднения объясняющих переменных, а доверительные интервалы для коэффициентов детерминации оказываются относительно широкими. В данной работе мы предлагаем развитие использованных в [2] для атлантического сектора Южного океана методов аппроксимации биомассы зоопланктона с помощью гидрофизических и биооптических данных, и анализируем эффективность разработанных подходов в южной олиготрофной зоне Атлантики.

Для анализа использовались данные отборов проб зоопланктона с 15 станций в южной части Атлантического океана, полученные в осенние сезоны 2012-2016 гг. Ловы проводились в слоях 0-200 м, 200-600 м, 600-1200 м и 1200-3000 м. Общее число видов зоопланктона в пробах составляет более 400. Вычисление биомассы на основе численности производилось по эмпирическим формулам [3]. Данные по концентрации хлорофилла «а» (Хл) и температуры (SST) в поверхностном слое получены со спутникового сканера цвета MODIS AQUA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Гидрологические параметры (соленость, температура, глубина перемешанного слоя), данные по распределению биогенов (нитраты, фосфаты) и вертикальные профили Хл получены из климатологии World Ocean Atlas 2018 и из базы данных измерений буев BGC-Argo [4, 5].

Были построены обобщенные линейные модели зависимости биомассы нескольких размерных фракций зоопланктона от всевозможных сочетаний объясняющих переменных, осредненных: 1) по времени за периоды длительностью от 0 до 180 дней, смещенные по времени от 0 до 400 дней до даты взятия пробы, 2) по пространству в областях радиусом от 30 до 300 км вокруг станций. Также в качестве объясняющей переменной рассматривался специальный параметр, характеризующий выраженность сезонного пика в среднемноголетней годовой динамике Хл. Качество построенных регрессий оценивалось по коэффициенту детерминации R^2 . Доверительные интервалы для оценок R^2 и коэффициентов регрессий строились непараметрическими методами на основе бутстрэп подходов с рандомизацией как зависимой, так и независимых переменных.

Для многих комбинаций слоя отбора и размерной фракции зоопланктона получены модели с высокими значениями коэффициента детерминации. Например, для мелкой фракции в верхней мезопелагиали (слой 200-600 м) значение R^2 для некоторых сочетаний объясняющих переменных превышает 0.85. Для мелкой фракции в батипелагиали (слой 1200-3000 м) наилучшее значение $R^2 > 0.6$. Средняя фракция также хорошо приближается в этих слоях ($R^2 > 0.7$). Крупная фракция хорошо приближается регрессиями в нижних слоях океана. Для интегральной биомассы качество регрессий оказалось существенно ниже, чем у наилучших регрессий для отдельных фракций. Вероятно, этот эффект обусловлен разным временем отклика размерных групп планктона на изменение условий среды: для мелких фракций оно существенно меньше, чем для крупных.

Обработка данных климатологических атласов и буев Био-Арго выполнены в рамках госзадания ИО РАН (тема FMWE-2024-0023), разработка и анализ статистических моделей выполнены при поддержке РФФ (проект 22-17-00154).

Список литературы

- 1) Vereshchaka A.L. Mikaelyan, A.S., Piontkovski, S.A., Lunina A.A. A mesoplankton biomass decline in the Central Atlantic coupled with an increase of surface temperature and an expansion of low-productive zones //Global Ecology and Biogeography. 2023. V. 32. №. 8. P. 1365-1376.
- 2) Vereshchaka A.L., Lunina A.A., Mikaelyan A.S. Surface chlorophyll concentration as a mesoplankton biomass assessment tool in the Southern Ocean region //Global Ecology and Biogeography. 2022. V. 31. №. 3. P. 405-424.
- 3) Виноградов М.Е. Функционирование планктонных сообществ эпипелагиали океана / М.Е. Виноградов, Э.А. Шушкина ; отв. ред. К. Н. Несис ; АН СССР, Институт океанологии им. П. П. Ширшова. – Москва : Наука, 1987.
- 4) Bittig H.C. et al. A BGC-Argo guide: Planning, deployment, data handling and usage //Frontiers in marine science. 2019. V. 6. P. 502.
- 5) Frenzel H., Sharp J., Fassbender A., Buzby N., Plant J., Maurer T. BGC-Argo-Mat: A MATLAB toolbox for accessing and visualizing Biogeochemical Argo data. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4971318>.

МАСШТАБИРОВАНИЕ ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДНА С ПОМОЩЬЮ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Анисимов И.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: наблюдения поверхности дна, подводные фотосистемы, буксируемые аппараты

Институт океанологии РАН на протяжении почти 20 лет проводит морские экспедиции, направленные на изучение экологического состояния акваторий Арктического региона [1]. Одной из важнейших задач является исследование структуры и динамики донных сообществ. Огромную роль в данных исследованиях играют визуальные наблюдения поверхности дна, проводимые с помощью фото- и видеосистемы в составе буксируемого необитаемого подводного аппарата (БНПА) «Видеомодуль», разработанного в ИО РАН [2]. Современное техническое оснащение БНПА позволяет выполнять протяженные трансекты, в ходе которых ведутся синхронные видео- и фотосъемки поверхности дна с высоким разрешением [3]. Одной из важных задач при обработке полученного материала является масштабирование изображений, после которого становится возможным измерение количественных параметров, таких как площадь поверхности дна в кадре и размеры присутствующих биологических объектов. Масштабирование видеоизображений происходит посредством двух лазерных указателей, проецирующих на поверхность дна две отметки на расстоянии 20 см друг от друга, вне зависимости от высоты аппарата над грунтом. Для масштабирования фотоизображений использование лазерных указателей затруднено, т.к. мощность их излучения мала по сравнению с мощностью импульсного источника света (ИИС), срабатывающего при получении каждого фотоснимка, вследствие чего на фотоизображениях лазерные отметки трудно различимы. Кроме того, конструктивные особенности БНПА «Видеомодуль» таковы, что лазерные указатели находятся в его передней части, тогда как фотокамера расположена ближе к середине, и при небольшом отстоянии от грунта лазерные отметки не попадают в область видимости фотокамеры. В докладе предложен метод, позволяющий производить масштабирование фотоизображений путем сопоставления их с соответствующими отмасштабированными видеоизображениями.

Метод заключается в нахождении перспективного преобразования, связывающего фото- и видеоизображение одного и того же участка поверхности дна. В некотором приближении поверхности дна можно считать плоской, поэтому перспективное преобразование имеет вид матрицы 3×3 и называется гомографией [4]. Вычисление гомографии происходит согласно следующему алгоритму:

- находятся точки соответствия фото- и видеоизображений (минимум 4 пары);
- составляется система линейных уравнений (СЛАУ), где неизвестными являются элементы матрицы гомографии;
- выполняется решение СЛАУ методом наименьших квадратов.

Таким образом, фотоизображению сопоставляется видеоизображение, на котором присутствует масштабная линейка в виде двух лазерных отметок. Перенос лазерных отметок на фотоизображение происходит умножением матрицы гомографии поочередно на вектор-столбец координат каждой отметки.

Метод был протестирован на выборке изображений, полученных в ходе экспедиций НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карское море. Полученный результат показывает эффективность предложенного метода и позволяет производить требуемые измерения на основе фотоизображений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024). Обработка фотоизображений выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00156).

Список литературы

- 1) Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В., Поярков С.Г., Анисимов И.М., Белевитнев Я.И., Пронин А.А., Тронза С.Н. Развитие технологии комплексных инструментальных подводных наблюдений применительно к экосистемам Российской Арктики // Океанология. 2019. Т. 59, № 4. С. 679-683.
- 2) Пронин А.А. Методика сбора и представления материалов видеосъемки поверхности дна с помощью необитаемого подводного буксируемого аппарата «Видеомодуль» // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 12-1. С. 142-147.
- 3) Анисимов И.М., Залота А.К., Лесин А.В., Муравья В.О. Особенности исследования биологических и техногенных объектов с использованием глубоководных буксируемых аппаратов // Океанология. 2023. Т. 63, № 5. С. 840-852.
- 4) Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision Cambridge. University Press, 2003. 676 p.

АЛГОРИТМ ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛИЙ В РЯДАХ АКТИВНОСТИ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА БИОМОНИТОРИНГА ВОДНОЙ СРЕДЫ

Вышкваркова Е.В., Греков А.Н., Маврин А.С.

Институт природно-технических систем, г. Севастополь

Ключевые слова: временные ряды, аномалии, биологические системы раннего обнаружения, Тета-модель, метод Кростона

Целью исследования является разработка алгоритма для обнаружения аномалий в измеренных рядах активности двустворчатых моллюсков (величина раскрытия створок). Ввиду возрастающей нагрузки на водные объекты на фоне промышленного развития человечества, урбанизации, развития сельского хозяйства подобные исследования крайне актуальны.

Исходной информацией послужили измеренные данные активности пресноводных двустворчатых моллюсков *Unio pictorum* Linnaeus, 1758, полученные за период март-апрель 2017 года. В работе проводится сравнение двух моделей прогнозирования: Тета-модели и методом Кростона.

Тета-модель [1] представляет собой простой метод прогнозирования, включающий подгонку двух тета-линий, прогнозирование линий с использованием простого экспоненциального сглаживания, а затем объединение прогнозов на основе двух линий для получения окончательного прогноза.

Конкретные этапы моделирования временных рядов с использованием Тета-модели:

- Тест на сезонность.
- Десезонализация, если обнаружена сезонность.
- Определение оптимальной модели, то есть определение параметров модели.
- Прогнозирование данных с помощью полученной модели.
- Повторная сезонная обработка, если в данных присутствовала сезонность.

Модель Кростона [2] — это метод, используемый при анализе временных рядов для прогнозирования временных рядов в ситуациях, когда имеются непостоянные данные или частые нули. Модель Кростона объединяет две оценки для создания взвешенного прогноза, который учитывает как уровень прерывистого спроса, так и интервал спроса. Уровень прерывистого спроса: рассчитывает уровень спроса для периодов, в которых происходят события, игнорируя нулевые периоды. Интервал спроса: рассчитывает интервал времени между событиями, снова игнорируя нулевые периоды.

В качестве меры для обнаружения аномалий в данных использовалась среднеквадратическая ошибка (СКО). Расчет СКО проводился на одночасовом промежутке времени для всех времен осреднения данных. Факт превышение порогового значения СКО является сигналом об аномалии. Анализ данных и реализация разработанного алгоритма проводились на языке программирования Python (V3.9.12) с использованием пакета машинного обучения scikit-learn (V 1.2.2) [3] и пакета статистических моделей statsmodels (V 0.14.1) [4].

С помощью разработанного авторами алгоритмически-программного обеспечения был произведен расчет СКО по всему набору данных, что позволило определить потенциальный порог для работы алгоритма, а также время реагирования алгоритма на аномалии при различных временах осреднения данных. Полученные результаты будут включены в алгоритмически-программное обеспечение автоматизированного комплекса биомониторинга состояния качества вод на основе двустворчатых моллюсков, который уже функционирует и размещен в акватории Севастополя [5].

Это позволит быстрее и с большей вероятностью обнаруживать аномалии и генерировать сигнал тревоги. Подобные комплексы могут быть установлены в зонах токсичных выбросов предприятий, в зонах забора питьевой воды, в рекреационных зонах для контроля качества воды отдыхающих (пляжей).

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда №23-29-00558, <https://rscf.ru/project/23-29-00558/>.

Список литературы

- 1) Assimakopoulos V., Nikolopoulos K. The theta model: a decomposition approach to forecasting // International journal of forecasting. 2000. Т. 16. №. 4. P. 521–530.
- 2) Croston J. D. Forecasting and stock control for intermittent demands // Journal of the Operational Research Society. 1972. Т. 23. №. 3. P. 289–303.
- 3) Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Müller A., Nothman J., Louppe G., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. Scikit-learn: machine learning in python // J. Mach. Learn. Res. 2011. V. 12. P. 2825–2830.
- 4) Seabold S., Perktold J. Statsmodels: Econometric and statistical modeling with python // Proceedings of the 9th Python in Science Conference. 2010. V. 57 (61). P. 10–25080.
- 5) Греков А.Н., Селезнев И.А., Ивакин Я.А., Греков Н.А., Вышкваркова Е.В., Трусевич В.В. Биологические системы раннего обнаружения для экологического мониторинга водной среды. Севастополь: ИПТС, 2023. 131 с.

АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

Буренин А.В.¹, Диденко В.В.²

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: эффект Доплера, оценка доплеровского смещения, сложные сигналы, M-последовательность на несущей, ЛЧМ-сигналы, автокорреляция

В докладе представлено продолжение исследования возможности автокорреляционной методики расчета доплеровского смещения частоты. Целью данной работы является оценка влияния вариаций параметров гидроакустического волновода (ГВ) на точность вычисления доплеровского смещения частоты. Выявлена зависимость расчета доплеровского смещения частоты от оценки когерентности гидроакустического волновода.

Автокорреляционная методика (АК) базируется на использовании сигнального пакета, включающем в себя не менее двух одинаковых произвольно расположенных в пакете сложных сигналов, автокорреляционная функция (АКФ) каждого из которых имеет один максимум при нулевом сдвиге по времени, а обработку принятого сигнала осуществляют путем «свертки» с самим собой. Временной интервал расчета интеграла АКФ может производиться на временном интервале не меньшем двух с половиной длительностей излучаемого сложного сигнала [1].

Эффект Доплера проявляется при движении источника и приемника относительно друг друга и заключается в изменении несущей частоты и длительности сигнала, регистрируемого приемником.

Натурные исследования по предлагаемой методике проводились на акустико-гидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН м. Шульца 17 августа 2013 года. В качестве излучателя использовался цилиндрический пьезокерамический излучатель. Характеристики излучателя позволяют работать с широкополосными сигналами на центральной частоте 2 кГц. Излучатель был свешен с яхты, которая перемещалась по заданной траектории в течение всего эксперимента. Для того чтобы точка излучения держалась на одном горизонте, излучатель был снабжен подводным крылом. Географические координаты траектории движения регистрировались системой GPS. Во время экспериментов были измерены вертикальные профили скорости звука. Используя данные системы GPS, координаты приемника и значение скорости звука, была рассчитана относительная скорость движения источник-приемник.

Для зондирования использовался сигнальный пакет, который состоял из четырех идентичных фазоманипулированных M-последовательностью сигналов (несущая 2 кГц, 255 символов, 4 периода на символ).

Были представлены результаты измерений доплеровского смещения частоты, используя АК подход, и данные GPS. Расчет доплеровского смещения АК методикой, проводился измерением длительности из АКФ, используя приведенные выше математические соотношения. Были вычислены среднее и среднеквадратичное (СКО) значения для этих девяти измеренных, соответствующих каждому принятому пакету. Приведена оценка доплеровского смещения, полученная с помощью GPS данных.

Анализ полученных данных показал, что минимальное СКО для доплеровского смещения АК методикой наблюдается при значении амплитуды АКФ $> 0,7$. Также значения доплеровского смещения АК методикой, соответствующие значению амплитуды АКФ $> 0,7$, наиболее близки к значениям доплеровского смещения, полученным с помощью GPS данных. Максимальному разбросу оценок доплеровского смещения АК методикой > 1 Гц соответствует значение амплитуды АКФ меньше $\sim 0,5$. Также, СКО значений доплеровского смещения АК методикой и среднее значение

амплитуды АКФ зависит от отношения сигнала/шум и характера этого шума, т.е. импульсная помеха, расположенная внутри принятого пакета увеличивает СКО как для значений доплеровского смещения АК, так и значения амплитуды АКФ даже при значении амплитуды АКФ близком к 1.

В качестве оценки корректности измеренной АК методом измерения длительности отдельного сложного сигнала в пакете выступает соотношение амплитуд АКФ, значения которых близки к определению временной когерентности [2]. Временная когерентность также лежит в интервале $[0, 1]$ и является мерой схожести сигналов между собой.

Подводя итоги можно заключить, что критерием корректности вычисления доплеровского смещения частоты с помощью АК методики является значение амплитуды нормированной АКФ. Нормированная АКФ принятого сигнала является аналогом функции временной когерентности. На корректность вычисления доплеровского смещения частоты влияет отношение сигнал/шум и характер шума.

Работа выполнена в рамках государственной тематики ТОИ ДВО РАН: «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: АААА-А20-120031890011-8); «Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем» (регистрационный номер: 0211-2021-0002). Анализ и интерпретация результатов проводились в рамках НИР ТОИ ДВО РАН «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей России и северо-западной части Тихого океана на основе мультиплатформенных наблюдений и оперативного гидродинамического моделирования», № гос. регистрации 123072000039-5

Список литературы

- 1) Способ оценки доплеровского смещения несущей частоты сложного сигнала // Буренин А.В. Патент на изобретение RU 2565237 C1, 20.10.2015. Заявка № 2014132669/07 от 07.08.2014.
- 2) Yang T.C. Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water // JASA. 2006. V.120, №5, P. 2595–2614.

РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ТЯЖЕЛОГО КЛАССА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МИРОВОГО ОКЕАНА

Зорнина Н.А.

ООО "Русская Морская Команда" г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: подводная робототехника, морские робототехнические комплексы, телеуправляемый обитаемый подводный аппарат

В современном мире стремительное развитие происходит в сфере подводной робототехники. Использование подводных роботов позволяет ускорить процесс выполняемых работ в сложных условиях больших глубин и низких температур, увеличить точность проводимых исследований и уменьшить, либо полностью исключить, человеческий фактор. Основными направлениями применения подводных роботов, в частности глубоководных ТНПА тяжелого класса, являются:

- Обзорно-поисковые работы, инспекция подводных сооружений и коммуникаций, поиск и обследование затонувших объектов;
- Океанографические исследования;
- Работы по обслуживанию подводных техногенных сооружений;
- Экологический мониторинг;
- Аварийно-спасательные работы при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

Особенно быстро растущую популярность применение средств подводной робототехники приобретает в сфере освоения шельфов арктического региона – использование ТНПА в условиях арктических акваторий является наиболее эффективным способом проведения подводных исследований в режиме реального времени, с возможностью записи процесса в высоком разрешении для последующего детального анализа.

В связи с растущей актуальностью применения подводных робототехнических средств, было решено осуществить разработку и создание ТНПА рабочего (тяжелого) класса силами инженерного состава компании ООО «РМК».

Назначение разрабатываемого ТНПА заключается в проведении геологоразведочных, аварийно-спасательных и обзорно-поисковых работ на глубине до 3000 м в температурном диапазоне от -20° до +35°С.

При подготовке к проектированию ТНПА был проведен сравнительный анализ технических характеристик и особенностей уже существующих моделей и определены основополагающие технические параметры разрабатываемой модели ТНПА:

- Общий габарит 3000 x 1600 x 2000
- Масса 5 т
- Мощность 150 лс
- Скорость 3 узла
- Полезная нагрузка 250 кг

ТНПА оснащен движительным комплексом, состоящим из восьми трастеров горизонтального и вертикального направлений движения. Манипуляторы позволяют проводить комплексные работы по техническому обслуживанию, ремонту, подъему донных конструкций/оборудования. Гидролокационное оборудование служит для определения условий окружающей среды с высокой точностью. Установленная система компенсации давления сохраняет все механизмы и оборудование в рабочем состоянии, предохраняет от поломок и разрушения, связанных с действием высокого давления на больших глубинах. Навесное оборудование ТНПА крепится на рамной конструкции,

выполненной из высокопрочного алюминия. Компенсировать вес рамы и установленного на ней оборудования позволяет блок плавучести, не дающий ТНПА самопроизвольно тонуть. Контроль над проведением подводных работ осуществляется оператором с берега с помощью видеокамер высокого разрешения и осветительных приборов, установленных на поворотном механизме.

Для обеспечения планируемого функционала ТНПА разработана система управления (СУ) аппаратом. Математическая модель СУ учитывает массогабаритные характеристики аппарата, мощность движительной системы и расположение в координатах его тела и параметры внешних физических воздействий - силу тяжести, выталкивающее усилие, демпфирующие силы и силы Кориолиса. Основной функционал СУ включает в себя ручное управление по перемещению в 6-ти направлениях, наличие режимов работы по автоматическому удержанию курса, глубины и скорости.

Математическая модель является ядром системы управления, вокруг которого надстраивается необходимый базовый функционал, такой как операторский интерфейс управления и дополнительный функционал – сопряжение с внешними цифровыми системами. Важной особенностью системы управления является минимизация задержки видеосигнала. Для этого используются специализированные электронные платы кодирования и декодирования видеосигнала отечественного производства.

Работы над проектом ТНПА были начаты в июне 2022 года и запланированы до конца 2025 г, с финальным этапом проведения натурных испытаний в морской акватории.

Освоение ресурсов мирового океана лежит в области приоритетных задач экологии, науки и безопасности. В связи с этим, индустрия подводной робототехники является сверхбыстрорастущим направлением в современном инженерно-техническом мире. Разработка новых и модернизация уже имеющихся подводных робототехнических устройств является гарантированным путем к успешному и быстрому развитию.

-

Список литературы

- 1) Илларионов Г.Ю., Карпачев А.А. Исследовательское проектирование необитаемых подводных аппаратов. Владивосток: Дальнаука, 1998. 270 с.
- 2) Дмитриев А.Н. Проектирование подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1978. 236 с.
- 3) Бахарев С.А., Карасев В.В., Карасев А.В. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения мирового океана. Научные труды Дальрыбвтуза, т. 6, 2012.

МЕТОД ВЫСОКОТОЧНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИКИ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН

Инь Вэньчжао

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: источники ближнего поля, оценка DOA, оценка частоты, оценка дальности, оценка высоты, кумулянт четвертого порядка.

Оценка направления прихода (DOA) сигналов, как показательная техника оценки параметров сигнала, является важным направлением исследований в области обработки сигналов массивов. Традиционные алгоритмы высокого разрешения для решения задачи оценки DOA обычно работают в предположении, что все источники находятся в дальнем поле массива и каждый сигнал, принимаемый массивом, имеет плоский волновой фронт [1]. Однако, когда источники расположены близко к массиву и находятся в области Френеля апертуры массива, приближение плоских волн к сферическим волновым фронтам не является более справедливым, и в этом случае вводятся источники ближнего поля. Используя кумулянт четвертого порядка и статистику второго порядка, исследуется двумерная задача оценки частоты, расстояния и многомерных параметров DOA источников ближнего поля и трехмерная задача оценки частоты, расстояния, DOA и высоты многомерных параметров источников ближнего поля. Основная часть работы состоит в следующем: Исследован метод оценки параметров источника ближнего поля на основе кумулянтов четвертого порядка. Метод на основе кумулянтов четвертого порядка не требует поиска спектральных пиков и применим к любой среде с аддитивным гауссовским шумом.

Для симметричного массива обсуждаются методы оценки параметров двумерного и трехмерного источников ближнего поля на основе кумулянтов четвертого порядка, проводится моделирование в среде гауссовского белого шума и гауссовского цветного шума, анализируется оценка влияния изменений на параметры. Результаты показывают, что кумулянты четвертого порядка могут эффективно оценивать параметры источника ближнего поля в условиях гауссовского цветного шума. Для случая несимметричного массива определяются новые матрицы на основе кумулянтов четвертого порядка, предлагается новый алгоритм совместного оценивания параметров несимметричного массива. Этот метод позволяет преодолеть потребность симметричного массива в нечетных элементах массива. Результаты моделирования показывают эффективность метода.

Исследован метод оценки параметров двумерных источников ближнего поля на основе статистики второго порядка. Метод на основе статистики второго порядка не может быть применен к гауссовскому цветному шуму, но по сравнению с кумулятивным методом четвертого порядка имеет меньшую вычислительную сложность. На основе существующего алгоритма статистики второго порядка предлагается усовершенствованный алгоритм. Сначала используется существующий алгоритм для оценки частоты и DOA, а затем с помощью оцененной DOA для одномерного конечного MUSIC-поиска получаем оценку расстояния. Новый алгоритм улучшает точность оценки расстояния по сравнению с существующим алгоритмом; результаты моделирования показывают улучшенную производительность нового алгоритма. Исследуется метод оценки параметров трехмерного источника ближнего поля на основе статистики второго порядка. Предложен улучшенный алгоритм, в котором необходимо вычислить только шесть матриц статистики второго порядка, без построения матрицы второго порядка высокой размерности. Результаты моделирования показывают, что улучшенный алгоритм уменьшает объем вычислений при условии отсутствия потерь производительности оригинального алгоритма.

Для сравнения разницы в производительности алгоритма кумулянтов четвертого порядка и алгоритма статистик второго порядка при двумерной и трехмерной оценке параметров источни-

ка ближнего поля проведено большое количество симуляций, проанализированы характеристики двух алгоритмов.

Грант от китайского совета по стипендиями (CSC)

Список литературы

- 1) Krim H., Viberg M. Two decades of array processing research: The parametric approach // MTS IEEE Signal Processing Magazine, 1996.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТБОРА ПРОБ МОРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ: ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ЛИЧНЫЙ ОПЫТ

Колесник А.Н.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: морская геология, донные осадки, грунтовый пробоотборник

Морские отложения – донные осадки современных и древних морей и океанов, резко преобладающие над континентальными отложениями. Изучением морских отложений занимается морская геология. Эта дисциплина развивается по следующим основным направлениям [1]:

- Подводная геологическая съемка
- Поиски и разведка подводных месторождений полезных ископаемых
- Исследования по общей и теоретической морской геологии – стратиграфические, литологические, геохимические, петролого-вулканические, морфотектонические, металлогенические
- Палеоокеанологические и палеоклиматические исследования
- Морские инженерные исследования
- Морские экологические исследования

Развитие всех перечисленных направлений невозможно без создания и развития технических средств и методических разработок для отбора проб морских отложений.

Цель доклада – рассмотреть основные технические средства, которые существуют в современной морской геологии для отбора проб морских отложений, провести сравнительный анализ, обозначить условия применения, сильные и слабые стороны, перспективы.

Для отбора проб морских отложений часто используют бокс- и мультикореры [1–3]. Их преимущество – ненарушенный поверхностный слой осадков, недостаток – небольшая мощность проб. Грунтовые трубки разных типов, самыми распространенными из которых являются гравитационные, напротив, отбирают длинные пробы (керны), но нарушают сложение и стратификацию осадков, особенно сильно нарушается поверхностный слой. Поэтому при выполнении морской геологической станции трубка обычно используется совместно с боксорером и/или мультикорером. Последовательный спуск с борта судна нескольких пробоотборников, а затем их последовательный подъем увеличивает время выполнения станции. К тому же не получается отобрать пробы в одной точке, расстояние между точками может составлять до одной морской мили (дрейф судна). Для неглубоких водоемов (озеро, эстуарий, залив, лагуна, прибрежная зона моря) проблема получения кернов с ненарушенным поверхностным слоем осадков решена с помощью трубки-бура и виброкорера [4, 5]. Техническим решением для морей и океанов с более сложными условиями пробоотбора является модифицированная версия гравитационной грунтовой трубки [6]. В ней доработаны такие элементы конструкции, как кернарватель, соединительные муфты секций, груз и такелажная скоба, удалены оголовье и запорная крышка. В результате сравнительного испытания обычной и модифицированной трубок в Чукотском море показано, что модифицированная трубка отбирает на 30 % более длинные керны, при этом практически не происходит нарушения поверхностного слоя осадков (последнее подтверждается геохимическими и колориметрическими данными) [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00098, <https://rscf.ru/project/24-27-00098/>).

Список литературы

- 1) Турский А.А. Техника морских геологических исследований. Л.: ЛГИ, 1980. 105 с.
- 2) Савельев В.И. Техника морских геологических исследований. М.: Недра, 1978. 165 с.

- 3) Смоллов Ю.С. Техника для отбора проб донных осадков. Опыт работ и перспективы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2015. № 1. С. 80–90.
- 4) Чечко В.А., Пака В.Т., Подуфалов А.П. Новый подход к получению стратиграфически не нарушенных колонок донных осадков в неглубоких водоемах // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 4. С. 177–184.
- 5) Гусев Е.А., Шнейдер Г.В., Рекант П.В., Каракозов А.А. Результаты неглубокого бурения на Таймыре и на шельфе восточно-арктических морей России // Горный журнал. 2021. № 12. С. 4–9.
- 6) Колесник А.Н., Колесник О.Н., Селютин С.А., Босин А.А., Астахов А.С. О результатах первого испытания модифицированной гравитационной грунтовой трубки в морской экспедиции // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России: Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Вып. 10. СПб., 2023. С. 130–133.

ECOLOGGER — ИЗУЧАТЬ ЖИЗНЬ, А НЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЖИЗНИ

Комарова Е.П., Гудимов А.В.

Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск

Ключевые слова: онлайн биомониторинг, эко-зонд, eco-logger, новый уровень знаний, экология, морские экосистемы, двустворчатые моллюски

Как известно, биология океана изучает, главным образом, результаты и структуры жизни (разнообразие, количество, строение, функции, их изменения и т.д.), а также отдельные реакции в лабораторных тестах. Биология – наука о жизни, но жизнь в природе, как процесс непрерывного взаимодействия организма с внешней средой все еще не достаточно исследована. Информации о самой жизни организмов в природной среде – их реакциях, активности, метаболизме, связи с колебаниями факторов среды, о жизненных процессах, механизмах адаптации и самом феномене жизни – нет. До последнего времени она была недоступна технически.

В то время как серийные океанологические зонды стали уже привычным инструментом гидрологических работ и автоматического мониторинга, подобный био-экологический зонд (прибор) непрерывной регистрации биологических и экологических процессов в природе, находится лишь в начальной, или пилотной стадии мировых разработок.

В биологическом мониторинге по-прежнему доминирует устаревшая технология исследований, на основе отбора проб ручными пробоотборниками. Получаемые данные традиционного пробоотбора не только крайне дискретны, неточны и ненадежны, но и не привязаны к локальному биотопу, к действующим изменениям природных факторов и их непрерывным колебаниям. Экологическое состояние данной акватории сейчас или в любой конкретный момент времени остается неизвестным. Реакции популяций и сообществ, а потому и результаты стандартного мониторинга запаздывают к изменениям среды на несколько лет. Оценка влияния любого фактора всегда неоднозначна и вероятностна, с рядом допущений. Поэтому фундаментально до сегодняшнего дня мы далеки от понимания истинных природных закономерностей в биологии и экологии морских организмов. Решением проблемы является разработка технологии получения непрерывной параметрической биологической информации («в цифре») о реальной жизни организмов в природных условиях.

В результате многолетних фундаментальных и прикладных исследований (1985-2016 гг.) нами разработана технология оперативного (онлайн) биомониторинга (ОБМ) на базе аппаратно-программного комплекса оперативного биомониторинга (АПК ОБМ) и биоиндикации [1]. АПК ОБМ прошел непрерывные круглогодичные испытания в условиях Баренцева моря в течение 5 лет (2016-2021 гг.). Важно отметить, что онлайн-биомониторинг основан на перманентной регистрации реакций организмов-биосенсоров (мониторов) в море, а не только в стационарных условиях, и потому требует обязательных фундаментальных исследований активности организма-монитора в естественных условиях (помимо лабораторных экспериментов). Нами исследовано влияние основных факторов природной среды, а также нескольких типов токсикантов на регистрируемые по нескольким параметрам поведенческие реакции двустворчатых моллюсков-биосенсоров.

Применение АПК ОБМ - первого экологического зонда (EcoLogger) позволяет выйти на принципиально новый уровень знаний, образующий современное прорывное направление («цифровая биология и экология непрерывных измерений»). Впервые мы получаем количественные/цифровые данные о жизни организмов, о которой, как выясняется, мы прежде не имели представления, несмотря на огромную базу результатов стандартного биомониторинга, лабораторные исследования и факторные эксперименты.

В прикладном аспекте, EcoLogger способен обеспечивать наиболее эффективный и непрерывный контроль экологической безопасности водной среды в режиме реального времени.

Проект открыт для сотрудничества в ближайшей перспективе, особенно в области применения нейросетей и новых типов датчиков для ОБМ и оперативной биоиндикации.

-

Список литературы

- 1) Gudimov A.V. The first IT systems for ecological online monitoring in water environment // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020.

ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ КАК ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ГАЗОВЫХ СИПОВ

Костеев Д.А., Ермошкин А.В., Разумов Д.Д., Салин М.Б.

Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук, г. Нижний Новгород

Ключевые слова: газовые факелы, сипы, гидроакустика, гидролокация, низкие частоты, фазированные антенны

Изучение рассеяния звука на пузырьках является классической задачей, в рамках которой в последнее время стала актуальной новая область применения - изучение сипов (от англ. seep – просачивание) – явлений естественного выхода газов из морского дна (преимущественно метана) в виде пузырьковой струи. Газовые «факелы» (газовые выбросы, сипы) встречаются в различных частях мирового океана [1], в том числе в Черном море, Охотском море и Арктических морях РФ. Практический интерес к изучению сипов связан, и с особенностями промышленного освоения шельфа, и с учетом дополнительного выхода парниковых газов в климатических моделях. Просачивания газа с морского дна можно разделить на выходящие на поверхность и находящиеся исключительно в водной толще. В первом случае, при достаточной интенсивности сипов, они могут быть обнаружены оптическими методами на поверхности [1], последние результаты указывают также на применимость радиолокационных методов [2]. В случае, когда сипы не выходят на поверхность, обнаружение и их изучение ведется, по большей части, с помощью высокочастотных (ВЧ) гидролокаторов, с рабочей частотой десятки – сотни кГц [3, 4].

Возможность лоцирования сипов на более низких частотах, несомненно, представляет интерес, в первую очередь, за счет дальнего распространения звука в волноводе, а во-вторых, за счет возможного возникновения резонансных эффектов при рассеянии [5]. Пузырек эффективно рассеивает звук, начиная со своей резонансной частоты, а для природных пузырьков резонансные частоты, исходя из их радиусов, составляют единицы килогерц. Поэтому при гидролокации в этом диапазоне частот, сипы должны оказаться очень контрастными целями. Существуют определенные сложности технического плана для работы в этом диапазоне. Например, необходимо применять протяженные приемные системы для обеспечения достаточного коэффициента направленности, а также конструирование мощных низкочастотных (НЧ) излучателей.

Однако в литературе отмечается, что сложности при измерении резонансного рассеяния носят главным образом методический характер. Сила цели пузырька на резонансе формально составляет большую величину, но в действительности ограничивается рядом факторов: во-первых, наличие примесей вносит заранее неизвестную поправку, и, во-вторых, коллективным взаимодействием пузырей. По этим двум причинам ожидается, что результаты оценки массовой доли газа в сипе, полученные на околорезонансной частоте, будут менее стабильными или достоверными, по сравнению с ВЧ. Тем не менее, ниша применения НЧ гидроакустики видится как минимум в первичном обнаружении газовых выбросов на дальних дистанциях. Например, это позволит сокращать время проведения полигонной съемки при картографировании района с сипами.

Настоящая работа посвящена методическим основам локации пузырьковых струй гидроакустическими сигналами на частотах, близких к резонансным частотам пузырьков. Такие частоты являются низкими по отношению к традиционным акустическим методам обнаружения сипов. Данная методика опробована в рамках натурального эксперимента, проведенного в северной части акватории Черного моря. Объектом исследования в данной работе выступал имитационный сип, создаваемый с помощью воздушного компрессора. Гидроакустическое зондирование проводилось по моностатической схеме с помощью ненаправленного пьезокерамического излучателя и вертикальной фазированной антенны гидрофонов. В качестве локационного сигнала были использова-

ны короткие тональные импульсы (3 мс) с частотами от 1 до 3 кГц. Предложен модифицированный метод межимпульсного вычитания, позволяющий выделить рассеянный сигнал от объектов, которые несут нестационарный характер (волнение, пузырьковая струя). Выход газа устойчиво наблюдался на дистанции 100 м от системы в шельфовой зоне с глубинами 30-50 м со средним отношением сигнал/шум 8 дБ. Проведен сравнительный анализ определения дистанции до сипа гидроакустическими и радиолокационными методами и зависимость данного параметра от скорости и направления течения.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 20-77-10081, <https://rscf.ru/project/20-77-10081/>.

Список литературы

- 1) Бондур, В.Г. Исследования естественных нефте- и газопроявлений на морской поверхности по космическим изображениям [Текст] / В.Г. Бондур, Т.В. Кузнецова // Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса, Научный мир. – 2012. – С. 272.
- 2) Ermoshkin, A. High-Resolution Radar Sensing Sea Surface States During AMK-82 Cruise [Текст] / A. Ermoshkin, A. Molkov // IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing. – 2022. – V. 15, – P. 2660-2666, DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3161119.
- 3) Shakova, N. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice [Текст] / N. Shakova, I. Semiletov, V. Serienko, L. Lobkovsky et al. // Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. – 2015. – V. 373 (2052). <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>.
- 4) Weidner, E. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux [Текст] / E. Weidner, T.C. Weber, L. Mayer, M. Jakobsson, D. Chernykh, I. Semiletov // Continental Shelf Research. – 2019. – V. 173, – P. 104. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.12.005>.
- 5) Бреховских, Л.М. Теоретические основы акустики океана [Текст] / Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов – Л.: Гидрометеиздат, – 1982. – 264 с.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЙ МАНИПУЛЯТОРАМИ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Красавин Н.А., Коноплин А.Ю., Василенко Р.П.

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН, г. Владивосток

Ключевые слова: подводный манипулятор, необитаемый подводный аппарат, позиционно-силовое управление, контактные операции

Необитаемые подводные аппараты (НПА), оснащенные многозвенными манипуляторами, способны эффективно выполнять различные контактные операции, начиная отбором проб грунта и заканчивая очисткой подводных объектов от обрастаний. На сегодняшний день уже известны различные подходы к выполнению таких работ. Например, в работах [1, 2] перед выполнением силовых операций было предложено жестко фиксировать НПА рядом с объектом работ с помощью второго манипулятора или посадочной станции соответственно. Однако в большинстве случаев применение этих подходов невозможно, поскольку для этого необходима подготовленная инфраструктура вблизи объектов работ. Считается, что для выполнения манипуляционных операций наиболее удобным является режим стабилизируемого зависания НПА рядом с объектом работ [3]. Для этого аппарат должен обладать развитым движительно-рулевым комплексом, способным управлять его перемещениями по шести степеням свободы [3] на основе информации о его линейных и угловых смещениях относительно исходного пространственного положения. Кроме того, НПА должен быть оснащен системой технического зрения (СТЗ) для идентификации целевого объекта и визуальной навигации вблизи него.

Известен способ [4] позиционно-силового управления манипулятором НПА в режиме его зависания, предполагающий создание тягами движителей аппарата упора в точке крепления манипулятора, необходимого для оказания его рабочим инструментом заданного воздействия на объект работ. Недостатком указанного способа является то, что его работоспособность зависит от точности стабилизации НПА в режиме зависания, а также от точности отработки движителями НПА желаемых величин тяг. Однако в реальных условиях работы требуемая точность стабилизации НПА при работающем манипуляторе практически недостижима. Это обусловлено инерционностью НПА, нелинейностью статических характеристик его движителей, ограниченной точностью и задержками при определении линейных смещений аппарата с помощью СТЗ.

В работах [5, 6] авторского коллектива предложено в процессе выполнения контактных операций компенсировать неизбежные линейные и угловые смещения НПА относительно объекта за счет изменения конфигурации манипулятора на основе информации о величинах указанных смещений, а также с учетом величины и направления идентифицируемого вектора силового воздействия рабочего инструмента на поверхность объекта. На основе этого подхода в данной работе выполнен синтез системы позиционно-силового управления НПА с ММ для выполнения в режиме стабилизируемого зависания исследовательских и технологических контактных операций. Причем исследовательские операции предполагают обеспечение заданного взаимного расположения пробоотборника и донной поверхности в процессе движения манипулятора без требований к конкретной величине усилия, оказываемого на эту поверхность. При выполнении более сложных технологических операций важно еще оказывать рабочим инструментом манипулятора на обрабатываемую поверхность силовое воздействие заданной величины и направления.

Было проведено полунатурное моделирование работы синтезированной системы с учетом гидродинамических и гидростатических сил сопротивления движению манипулятора и НПА, присоединенных моментов инерции и масс жидкости, нелинейного взаимодействия движителей аппарата с окружающей жидкостью, а также задержек при получении навигационной информации о линейных смещениях НПА от СТЗ. Результаты проведенного моделирования показали высокую

эффективность и точность работы синтезированной системы при выполнении различных контактных манипуляционных операций в режиме зависания НПА, в том числе при наличии неучтенных деформаций обрабатываемой поверхности. При этом в процессе выполнения наиболее ответственных силовых работ система сначала обеспечивала достижение заданного усилия инструментом манипулятора в начальной точке траектории, после чего инструмент двигался по этой траектории, поддерживая непрерывный контакт с поверхностью и сохраняя заданные величину и направление силового воздействия.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

Список литературы

- 1) Bae J., Bak J., Jin S., Seo T., & Kim J. Optimal configuration and parametric design of an underwater vehicle manipulator system for a valve task // Mechanism and Machine Theory. Vol 123. 2018. P. 76-88.
- 2) Palomeras N., Ridao P., Ribas D., & Vallicrosa G. Autonomous I-AUV docking for fixed-base manipulation // IFAC Proceedings Volumes. №47(3). 2014. P. 12160-12165.
- 3) Коноплин А.Ю., Юрманов А.П., Красавин Н.А., Пятавин П.А. Разработка, программная реализация и исследование системы управления многозвенными манипуляторами необитаемых подводных аппаратов при динамическом позиционировании над морскими объектами // Подводные исследования и робототехника. №. 3 (37). 2021. С. 4-15.
- 4) Timoshenko A., Zuev A., Filaretov V. An approach to the construction of high-quality position force control systems for autonomous underwater vehicles with a multi-link manipulator // 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2023. P. 46-50.
- 5) Konoplin A., Krasavin N. Approach to perform contact manipulation operations by AUV with multilink manipulators// 2023 International Conference on Ocean Studies (ICOS). 2023. P. 65-68.
- 6) Коноплин А.Ю., Красавин Н.А., Юрманов А.П., Пятавин П.А., Кацуриин А.А. Система позиционно-силового управления подводными аппаратами с многозвенными манипуляторами для выполнения контактных манипуляционных операций // Подводные исследования и робототехника, 2022, № 4, С. 40-52.

РЕГИСТРАЦИЯ СПЕКТРОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МНОГОКАНАЛЬНОГО ФЛЮОРИМЕТРА ФР-1

Кудинов О.Б.¹, Мансурова И.М.²

¹Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь

²Институт биологии южных морей имени А.О.Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: спектр, возбуждение флюоресценции, флюориметр, фитопланктон, монокультура

В настоящее время, при проведении гидрооптических измерений в Мировом океане применяются флюоресцентные методы, которые позволяют оценить пространственное распределение фитопланктона. Информация о его распределении необходима для биологического мониторинга за экологическим состоянием водной среды, оценки биопродуктивности и трофности вод [1]. Флюоресценцию фитопланктона *in situ* регистрируют с использованием зондирующих многоканальных флюориметров. Однако из-за санкционных ограничений, введенных со стороны некоторых государств, существенно уменьшилась возможность их приобретения и обслуживания в нашей стране. Необходимо отметить, что флюориметры иностранного производства, в большинстве, работают по принципу «черного ящика», не предоставляя доступа исследователю к алгоритмам обработки данных. В этой связи актуальной становится задача освоения компетенций по разработке отечественных зондирующих флюориметров и алгоритмов обработки данных. И такой флюориметр (ФР-1) был разработан в отделе оптики и биофизики моря Морского гидрофизического института [2, 3].

Флюориметр ФР-1 осуществляет возбуждение и регистрацию сигналов в нескольких спектральных диапазонах. Возбуждение: 360 – 390 нм, 425 – 470 нм, 500 – 550 нм, 565 – 600 нм, 595 – 645 нм. Регистрация флюоресценции: 200 – 380 нм, 410 – 520 нм, 490 – 565 нм, 540 – 610 нм, 610 – 800 нм и 665 – 800 нм. Он позволяет получать вертикальные профили интенсивности флюоресценции (ИФ) хлорофиллов, бактериохлорофиллов, фикобилинов и каротиноидов, окрашенного растворённого органического вещества, а также спектров возбуждения флюоресценции (СВФ) фитопланктона. СВФ фитопланктона представляет собой график зависимости ИФ от длины волны возбуждающего света. Регистрируемый СВФ фитопланктона определяется его пигментным составом.

Целью данной работы является выполнение валидации спектров возбуждения флюоресценции различных монокультур фитопланктона, полученных с использованием флюориметра ФР-1 и СВФ полученных на лабораторном спектрофлюориметре RF-6000 (Shimadzu, Япония).

Для работы были подготовлены пробы нескольких монокультур фитопланктона: *Rhodomonas salina* (Wislouch) D.R.A.Hill & R.Wetherbee, 1989; *Prorocentrum cordatum* (Ostenfeld) J.D.Dodge, 1976; *Chrysotila stipitata* Anand 1936: 282; *Prorocentrum micans* Ehrenberg, 1834, из коллекции живых планктонных микроводорослей ФИЦ ИнБЮМ. Перед измерением пробы адаптировали к темноте в течении 30 минут, после чего измеряли «ноль» на питательной среде f/2 [4]. Для проведения измерений СВФ фитопланктона в лабораторных условиях, для флюориметра ФР-1 была разработана специальная приставка – кюветодержатель. В которую устанавливается кварцевая кювета с пробой, объёмом 1 см³, с четырьмя прозрачными полированными гранями. Измерения проводятся по схеме регистрации флюоресценции под углом 90°. Лучи возбуждающего излучения, испускаемые флюориметром ФР-1, проходят сквозь кювету вызывая излучение флюоресценции в пробе, которое выходя из кюветы поступает на фотоприёмный иллюминатор флюориметра. Возбуждение флюоресценции осуществлялось во всех пяти спектральных диапазонах, регистрация производилась в красной области спектра в диапазоне 665 – 800 нм.

Указанные монокультуры фитопланктона также были проанализированы с использованием лабораторного спектрофлуориметра RF-6000. Параметры работы RF-6000: диапазон длин волн возбуждения 300 – 700 нм; диапазон длин волн регистрации 300 – 800 нм; шаг измерения 2 нм; скорость сканирования 60000 нм/мин.

Полученные СВФ фитопланктона имеют вид кривой с максимумом в синей области спектра: 435 – 470 нм, нарастая из УФ области спектра с последующим снижением в оранжевой области спектра и далее с небольшим увеличением ИФ в красной области спектра: 620 – 650 нм. СВФ зарегистрированные с использованием ФР-1 показали сходный характер изменчивости со спектрами, полученными с использованием RF-6000 для трёх групп фитопланктона, т.к. они имеют сходный пигментный состав, кроме *R.salina*, в составе которых присутствуют фикоэритрин и фикоцианин. Для спектров, полученных с использованием ФР-1, выявлены несколько завышенные значения ИФ в красной области спектра. Что связано с тем, что при возбуждении в красной области спектра часть возбуждающего излучения проходит через регистрирующий светофильтр.

Проведённое исследование показало, что определение СВФ фитопланктона с использованием флуориметра ФР-1 возможно, полученные данные корректны и совпадают со спектрами полученными на RF-6000. Определено, что СВФ монокультуры содержащей фикобилины, требует более детального исследования. Выявлена необходимость разработки процедуры коррекции регистрируемого сигнала в красной области спектра, что будет выполнено в дальнейшем.

Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования "Молекулярная структура вещества" Севастопольского государственного университета за сотрудничество.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания: FNNN-2024-0012 «Анализ, диагноз и оперативный прогноз состояния гидрофизических и гидрохимических полей морских акваторий на основе математического моделирования с использованием данных дистанционных и контактных методов измерений («Оперативная океанология»)

Список литературы

- 1) Чурилова, Т. Я. Зависимость квантового выхода фотосинтеза от поглощения света фитопланктоном: получение количественных связей для оценки первичной продукции в Черном море / Т. Я. Чурилова, В. В. Суслин, Х. М. Сосик // Морской гидрофизический журнал. – 2021. – Т. 37, № 1(217). – С. 73-84. – DOI 10.22449/0233-7584-2021-1-73-84. – EDN XCAUYZ.
- 2) Кудинов О.Б., Мартынов О.В., Ли М.Е. Спектральный измеритель флуоресценции и рассеяния// Труды IX Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». – СПб., 2017. С.217-223.
- 3) Кудинов О.Б., Ли М.Е. Регистрация флуоресценции фитопланктона с использованием экспериментального зондирующего измерителя. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023;16(4):116–128. [https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16\(4\)-10](https://doi.org/10.59887/2073-6673.2023.16(4)-10)
- 4) Guillard R. R. L., Ryther J. H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* Hustedt, and *Detonula confervacea* (Cleve) Gran // Canadian journal of microbiology. – 1962. – Т. 8. – №. 2. – С. 229-239.

РАЗРАБОТКА КОНВЕРТЕРА АРХИВНЫХ ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ

Лахно О.В.

Институт океанологии имени П. П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: подводные объекты, гидролокатор бокового обзора, гидролокационные данные, программно-математическое обеспечение

В настоящее время особое внимание уделяется состоянию морского дна в береговой полосе. Контролируется состояние инженерных сооружений, например, свай причалов и их остатков, а также отходов промышленности и затопленных судов [1]. К тому же, состояние таких сооружений постоянно ухудшается в процессе использования. Чтобы контролировать его было проще, разработаны гидроакустические средства. Гидролокатор бокового обзора (ГБО) [2] – это одно из основных гидроакустических средств, которые используются для проверки состояния кабелей, подводных сооружений, мониторинга подводной обстановки в неизвестных водах и для поиска, классификации подводных объектов. Если стоит задача определить динамику изменений объектов, для ее решения необходимы данные за ранний период времени. На заре гидролокационных технологий, запись данных велась с помощью аналоговых самописцев и термопринтеров. С течением времени и развитием технологий, запись гидролокационных данных стала производиться в цифровом виде, однако единый стандарт такой записи был выработан не сразу. Так, например, в Институте океанологии был разработан собственный формат РАСТР [3], используемый специалистами лаборатории гидролокации дна в течение более 50 лет, однако, не позволяющий работать с ним в стороннем программном обеспечении (ПО). В настоящее время, одним из распространенных стандартов гидролокационных файлов является Extended Tritone Format (*.xtf). На сегодняшний день, этот формат также был выбран для хранения данных современных гидролокаторов Лаборатории гидролокации дна, так как с ним работает большое количество современных программ. Обработка данных в едином формате позволила бы составить стандартизированную базу данных многолетних гидролокационных исследований в различных акваториях Мирового океана.

Таким образом, задачей данной работы, является разработка и создание программно-математического обеспечения (ПМО), позволяющего конвертировать гидролокационную информацию, собранную в файлы оригинального формата разработки ИО РАН (РАСТР) *.lft, *.rgt и *.nav в файлы формата *.xtf, для облегчения последующего анализа, исследования новых возможностей для понимания морфологии, эволюции морского дна. Объектом исследования послужили гидролокационные данные, полученные в различных географических точках в ходе экспедиций ИО РАН. Предметом исследования является разработка конвертера в стандартизированный формат и обработка архивных данных гидролокаторов. Для реализации преобразователя файлов, был выбран язык программирования Python. Результатом данной работы является программа, которая конвертирует данные формата РАСТР, полученные ранее Лабораторией в результате работы в различных акваториях, в формат XTF, который является используемым в данный момент. На данный момент, в результате реализации конвертера, был преобразован массив ГБО съемок и планируется способ хранения этих данных для удобного сопоставления и последующей обработки.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024)

Список литературы

- 1) Воронин В.А., Ходотов А.В., Скняря А.В., Тарасов С.Л., Трусилов В.Т. Использование гидролокатора бокового обзора со сложным сигналом для экологического мониторинга дна и инженерных подводных сооружений // Известия ТРТУ. Тематический выпуск “Экология

2004-море и человек". Материалы Третьей Всероссийской научной конференции с международным участием. Таганрог. 2004. N5(40). С. 80–82.

- 2) Римский-Корсаков Н.А. Гидролокационные средства и практика подводных исследований в ИО РАН // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. 9 научно-технической конференции. Москва, 2005. Часть 1. С. 33–46.
- 3) Римский-Корсаков Н.А., Тронза С.Н., Анисимов И.М. Архивирование гидролокационных данных океанологических исследований дна акваторий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 10. С. 47–53.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ НОВЕЙШИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ БУКСИРУЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Лесин А.В., Анисимов И.М.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: электроснабжение, буксируемый обитаемый подводный аппарат, БНПА, источники питания.

В методах изучения Мирового океана наиболее часто используют различные виды подводных аппаратов (ПА). Наиболее распространённые: телеуправляемые обитаемые подводные аппараты (ТНПА), обитаемые подводные аппараты (ОПА), автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) и буксируемые обитаемые подводные аппараты (БНПА).

Всем вышеперечисленным аппаратам необходим внешний источник питания. Энергоснабжение таких аппаратов бывает двух видов: непрерывное и автономное. Непрерывное энергоснабжение осуществляется за счет генерации электроэнергии различными неэлектрическими видами энергии. При выборе автономной системы энергоснабжения ПА используют аккумуляторные батареи. Время работы таких ПА ограничено емкостью аккумуляторов и требуют подъема аппарата для замены или зарядки аккумуляторной батареи. Существуют альтернативные методы заряда при использовании энергии Мирового океана: система преобразования энергии морских волн в электрическую и система преобразования энергии морских течений в электрическую [1].

Современные источники электроснабжения поражают своим разнообразием от энергетических характеристик до форм-фактора.

Применение БНПА, оснащенных фото-, видео- и гидролокационными системами, доказало свою эффективность в наблюдении поверхности дна в рамках комплексных исследований Мирового океана. В круг задач, решаемых с помощью аппаратов этого класса, входят биологические исследования донной фауны, а также исследования подводных объектов техногенного происхождения.

Начиная с 2015г. в Арктических экспедициях Института океанологии РАН (ИО РАН) применяется БНПА «Видеомодуль», разработанный в лаборатории гидролокации дна ИО РАН [2]. Изначально комплекс БНПА включал одну телевизионную камеру с заливающими источниками света (ИЗС). В процессе ежегодных исследований, от экспедиции к экспедиции, БНПА совершенствовался в соответствии с новыми требованиями, предъявляемыми научной проблематикой. На БНПА устанавливали новые приборы и устройства сбора информации об окружающей среде, повышали их разрешающую способность, расширяли возможности системы передачи информации, модифицировали существующие узлы.

В настоящий момент БНПА «Видеомодуль» представляет собой комплексную систему визуального наблюдения с возможностью получения в реальном времени гидролокационных изображений, фото- и видеозаписей, синхронизированных между собой [3].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024). Реализация новейших источников электроэнергии БНПА «Видеомодуль» выполнена за счет гранта РФФИ (проект №23-17-00156)

Список литературы

- 1) Мартынов А.А., Самсыгин В.К., Соколов Д.В.. Способы и устройства энергообеспечения подводных аппаратов // Труды Крыловского государственного научного центра. Т.4, № 398. 2021. С 93–103.

- 2) Поярков С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В. Технические аспекты исследований окружающей среды западной части Карского моря // Океанологические исследования. 2017. Т. 45. № 1. С. 171–186.
- 3) Анисимов И.М., Залота А.К., Лесин А.В., Муравья В.О. Особенности исследования биологических и техногенных объектов с использованием глубоководных буксируемых аппаратов // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 840–852.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ МНОГОЛУЧЕВОГО РАЗРЕЖЕННОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

Лю Кэсинь

Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток

Ключевые слова: гидроакустика, гидроакустическая связь, модель канала распространения

Эффективным средством, и практически, единственным средством коммуникаций в подводной среде является гидроакустическая связь. Подводные звуковые каналы (ПЗК) обладают сложными связными характеристиками, существенно влияющими на работу приборов гидроакустической связи. Поэтому корректная оценка ПЗК значительно повысит эффективность работы данных приборов [1]. Основной характеристикой ПЗК является многолучевой эффект, вызывающий задержки времени принимаемого сигнала и приводящий к межсимвольной помехе в приемных трактах. Также, ПЗК изменяется во времени из-за относительного движения между передатчиком и приемником и изменений морской среды. Методы оценки ПЗК требуют возможности разделения соседних многолучевых путей звуковых лучей с высоким разрешением и низкой сложности для вычисления в реальном времени.

Эксперименты по тестированию подводной связи показывают, что энергия импульсной характеристики ПЗК концентрируется в нескольких многолучевых задержках, т.е. ПЗК являются разреженным. Завершено моделирование глубоководных каналов в летний период посредством акустического инструментария BELLHOP на основе данных телеметрии от центра информации океана и использование данного канала для оценки. Результаты моделирования показывают многолучевость и разреженность канала. Использовалась известная псевдослучайная последовательность в качестве входного сигнала и получен выходной сигнал оценки, прошедший через канал моделирования.

Оценка канала по сути является проблемой деконволюции и для разреженных каналов существует возможность использования методов сжатых измерений. Обычно используется метод отслеживания ортогонального соответствия (ОПМ, Orthogonal Matching Pursuit), оценивающий импульсную функцию канала путем минимизации l_0 -параметра. Но решение парадигмы l_0 является NP-задачей. Приближенное решение парадигмы l_0 алгоритмом ОПМ не гарантирует глобальной сходимости [2]. Используется быстрый алгоритм деконволюции, основанный на минимизации парадигмы l_1 - l_2 используемой реализации БПФ [3]. Доказано, в алгоритме гарантируется глобальная сходимость. Имитационные эксперименты показывают высокую эффективность оценки и низкую сложность алгоритма, также обладает устойчивостью при низком отношении сигнал/шум.

Грант от китайского совета по стипендиями (CSC)

Список литературы

- 1) Li W. Estimation and tracking of rapidly time-varying broadband acoustic communication channels // MIT. 2006. 207 pp.
- 2) Boyd S., Vandenberghe L. Convex optimization // Cambridge University Press. 2006. pp. 302.
- 3) Wang Y., Yang Y., Xu L., Bai X. Robust sparse underwater acoustic channel estimation method via projected l_1 - l_2 optimization // In Proc. MTS/IEEE OCEANS, Genova, Italy, 2015.

ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И НАБЛЮДЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ДНА АКВАТОРИЙ И ПОДВОДНЫХ ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Муравья В.О., Анисимов И.М., Лесин А.В., Римский-Корсаков Н.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва

Ключевые слова: ТНПА, поиск и обследование затопленных объектов, экспедиционные работы, подводная съемка

Интерес к телеуправляемым обитаемым подводным аппаратам (ТНПА) объясняется безопасностью и удобством их использования [1,2]. Одной из задач, которую можно решать при помощи ТНПА, является поиск, обследование и дальнейший мониторинг затопленных объектов подводных захоронений радиоактивных отходов [3]. Для проведения целенаправленных измерений радиоактивности, на аппарат устанавливается дополнительное оборудование, например бортовой гамма-спектрометр, которое сопровождается особой методикой работы.

Работы проводятся с борта научно-исследовательского судна (НИС). В случае, если затопленные объекты с твердыми радиоактивными отходами находятся в стесненных акваториях (заливах, бухтах) или на мелководье, где судоходство невозможно, то поиск производится с использованием вспомогательного плавсредства – судового моторного катера.

Технология визуальных наблюдений и измерений радиоактивности с помощью аппаратуры, установленной на ТНПА класса «мини» определяется глубиной, на которой находится затопленный объект. На глубинах до 50 метров возможно использование ТНПА с малогабаритного заякоренного плавсредства. В случае, если не представляется возможным поставить НИС на якорь в непосредственной близости от обнаруженного объекта, либо дополнительный поиск проводится в несудоходной акватории, судно ложится в дрейф, либо встает на якорь по возможности ближе к объекту. Дальнейшие работы проводятся с вспомогательного плавсредства, например судового катера, имеющего каюту-укрытие для размещения электронной управляющей аппаратуры ТНПА. Плавсредство с малогабаритным ТНПА, энергетическим и навигационным оборудованием, а также группой из 4-х специалистов (моторист, навигатор, оператор ТНПА, оператор гамма-спектрометра) спускается за борт судна. Плавсредство выходит в точку, лежащую в непосредственной близости от обнаруженного объекта с использованием КНС (GPS, ГЛОНАСС) и эхолота. Подход к объекту сопровождается эхолотным промером. При появлении на экране эхолота катера отметки от исследуемого объекта производится сброс якоря. Далее ведется погружение ТНПА и работа с ним на объекте. Выход ТНПА на объект осуществляется визуально, либо с помощью гидролокатора кругового обзора (ГКО) при его наличии. После установления визуального контакта с объектом проводится его детальная видеосъемка и измерения параметров, в том числе радиоактивности. Все забортные работы сопровождаются непрерывным измерением глубин эхолотом, а навигационная привязка обеспечивается КНС (GPS, ГЛОНАСС).

Если есть возможность постановки обеспечивающего судна на якорь в непосредственной близости от обнаруженного объекта, то работы ведутся непосредственно с НИС. После постановки судна на якорь за борт спускается ТНПА, который наводится оператором на объект. После визуального контакта с объектом оператор ТНПА производит его обследование, идентификацию, видеосъемку и, если необходимо, измерение радиоактивности с помощью бортового гамма-спектрометра. Но в этом случае есть ряд причин, которые негативно сказываются на работе с ТНПА. К примеру, крупное НИС, поставленное на якорь, под действием ветра постоянно меняет свое положение в горизонтальной плоскости. При этом точка схода кабеля связи судового оборудования и ТНПА, находящегося под водой, может изменять свое положение в пределах до 100 м. с

периодом в несколько минут. Это обстоятельство делает практически невозможным использование даже ТНПА осмотрового класса с длиной кабеля до 600 м. в режиме прямого погружения с судна. Работа с дрейфующего судна тем более невозможно. В режиме же удержания судна в точке на движителях существует опасность повреждения кабельной линии гребными винтами главных ходовых и подруливающих машин. Поэтому предпочтительнее осуществлять работу с ТНПА с дополнительного малогабаритного плавсредства.

Методика работы основывается на многолетнем опыте целенаправленных наблюдений и радиационных измерений в заливах Новой Земли. Работы выполняются сотрудниками Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, совместно с коллегами из Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», центра подводных исследований Русского Географического общества и центра спасательных операций «Лидер» МЧС России, с использованием ТНПА класса мини «ГНОМ» и «РБ-300» при погружениях с борта судового катера, а также «SeaEye Falcon» и «Argus Mini System» при погружениях с борта НИС.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0024). Участие в экспедиции на НИС Академик Мстислав Келдыш выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-17-00156).

Список литературы

- 1) Garcia, J.C., Patrao, B., Almeida, L., Perez, J., Menezes, P., Dias, J., Sanz, P.J. A Natural Interface for Remote Operation of Underwater Robots // IEEE Computer Graphics and Applications. 2017. № 1 (37). P. 34–43.
- 2) Коноплин, А.Ю., Денисов, В.А., Даутова, Т.Н., Кузнецов, А.Л., Московцева, А.В. Технология использования ТНПА для комплексного исследования глубоководных экосистем // Подводные исследования и робототехника. 2019. №30(4). С. 4–12.
- 3) Поярков С.Г, Римский-Корсаков Н.А., Флинт М.В. Технические аспекты исследований окружающей среды западной части Карского моря // Океанологические исследования. 2017. №45(1). С. 171–186.

СОВРЕМЕННЫЙ НАУЧНО-ЭКСПЕДИЦИОННЫЙ ФЛОТ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ И АНТАРКТИКЕ

Пацева П.В., Чернов А.В., Савицкая А.В., Крупина Н.А., Свистунов И.А.

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: научно-экспедиционное судно, дрейфующая платформа, Арктика, Антарктика

За последние 15 лет мировой флот пополнился несколькими новыми судами, предназначенными для эксплуатации в Арктике и Антарктике [1].

В 2018 году был построен норвежский «Kronprins Haakon», в 2019 году — «Xue Long 2» (Китай) и «Sir David Attenborough» (Великобритания). В 2022 году завершилось строительство австралийского судна «Nyuna».

В настоящее время в Чили достраивается судно ледового класса «Almirante Viel». В Бразилии к 2025 году предполагается построить специализированное судно «Almirante Saldanha», предназначенное для выполнения национальной антарктической программы.

В Германии к 2027 году предполагается построить новое научно-исследовательское судно на замену ледокола «Polarstern», эксплуатирующегося с 1982 года. Также в планах строительство новых судов для антарктических программ Аргентины, Индии, США и ряда других стран.

Основную научно-экспедиционную деятельность в Арктике и Антарктике в интересах Российской Федерации осуществляет флот Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), который в настоящее время состоит из трех судов:

- НЭС «Академик Фёдоров» (год постройки: 1987);
- НЭС «Академик Трёшников» (год постройки: 2012);
- НЭС «Северный Полюс» (год постройки: 2022).

НЭС «Академик Трёшников» — современное судно, которое активно используется как для обслуживания арктических и антарктических станций, так и для проведения научных экспедиций в Арктике и Антарктике.

Отдельно стоит отметить НЭС «Северный полюс», которое является уникальным судном и представляет собой ледостойкую самодвижущуюся платформу (ЛСП), предназначенную для проведения круглогодичных научных исследований в Арктике в условиях продолжительного дрейфа.

НЭС «Академик Фёдоров» ежегодно выполняет рейсы в Антарктиду в течение 37 лет. Для обеспечения бесперебойной работы Российской антарктической экспедиции необходимо использование двух научно-экспедиционных судов. В связи с физическим износом НЭС «Академик Фёдоров» появилась потребность в строительстве нового научно-экспедиционного судна.

25 декабря 2023 года на Адмиралтейских верфях в Санкт-Петербурге началась резка металла для нового НЭС «Иван Фролов». Судно войдет в состав флота ААНИИ и будет использоваться как для обеспечения деятельности арктических и антарктических станций, так и для проведения морских научно-исследовательских работ. Предполагается, что НЭС «Иван Фролов» будет построено в 2028 году и заменит действующее НЭС «Академик Федоров».

Длина нового НЭС составит 165 метров, ширина — 26 м, осадка — 8,5 м. Водоизмещение судна — 25000 т, дедвейт — 9200 т. Пропульсивный комплекс будет состоять из двух винторулевых колонок мощностью 8 МВт каждая. Судно будет соответствовать ледовому классу Arc7. При этом ледопробиваемость на заднем ходу составит — не менее 1,2 м, на переднем ходу — не менее 1,1 м при движении со скоростью 2 узла. Отработка формы корпуса была выполнена в ледовом бассейне ААНИИ при проведении модельных испытаний.

На судне смогут комфортно разместиться 240 человек: 70 членов экипажа и 170 пассажиров (ученые, зимовочный и сезонный состав станций, члены авиаотряда). НЭС предусматривает базирование в ангаре двух вертолетов типа Ка-32, Ми-8 или Ми-38.

В научно-исследовательский комплекс судна будет входить 20 лабораторий, включая метеосиноптическую и гидроакустическую лабораторию, лабораторию приема спутниковой гидрометеорологической информации, океанологический, гидрохимический, геологический, ледоисследовательский и экологический комплексы. Предполагается размещение на судне телеуправляемых подводных и беспилотных летательных аппаратов. Для повышения безопасной эксплуатации в ледовых условиях и проведения научных исследований взаимодействия корпуса со льдом судно будет оснащено системой мониторинга ледовых нагрузок. На НЭС будет установлена П-образная рама с высотой в свету 7 м, грузоподъемностью 12 т для проведения пробоотборных работ. Такое оснащение судна позволит расширить спектр стандартных научных исследований.

Таким образом, НЭС «Иван Фролов» станет новым флагманом российского полярного флота и позволит научно-экспедиционному флоту ААНИИ стать одним из самых больших и современных в мире.

-

Список литературы

- 1) Чернов А.В. О новом научно-экспедиционном судне Росгидромета // Российские полярные исследования № 3(53). 2023. С. 36–38.

КОМПАКТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЗАПИСИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ОТ ПОДВОДНОГО ИСТОЧНИКА ПУЗЫРЬКОВОГО ГАЗА: ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Рогальский Л.Ю.¹, Будников А.А.¹, Малахова Т.В.²

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

²Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, г. Севастополь

Ключевые слова: портативное записывающее устройство, гидрофон, метановые сипы, эмиссия парниковых газов, пассивная гидроакустика

Анализ акустических сигналов, производимых холодными сипами, является важным инструментом при мониторинге активности подводных газовыделений и оценке объема выделяющегося парникового газа. Данные пассивной акустики позволяют различать различные режимы дегазации, идентифицировать отдельные пузырьки, определять их количество и примерный размер [1, 2, 3]. Для записи подводных акустических сигналов обычно применяются всенаправленные гидрофоны, подключаемые к аналого-цифровому преобразователю и ведущие запись в широком диапазоне частот. Цена подобных устройств составляет порядка нескольких сотен тысяч рублей. Для мониторинга количества выделяющихся пузырьков от точечного источника а также их частотных характеристик авторами было разработано компактное устройство на базе платы управления ivr510-m-v01 с внешним выносным электретным микрофоном. Устройство размещается в водонепроницаемом цилиндрическом корпусе диаметром 6 см и длиной 22 см. Микрофон выведен наружу через отверстие в корпусе и закрыт силиконовой крышечкой толщиной 0.5 мм, плотно прилегающей к самому микрофону. Частота собственных колебаний газовых пузырьков на глубинах до 50 м находится в диапазоне от 100 до 1500 Гц. Используемый в устройстве микрофон работает в диапазоне частот от 20 до 20000 Гц, что является достаточным для записи акустических сигналов, генерируемых выделяющимися из сипов пузырьками. Устройство позволяет производить запись с частотой дискретизации 48 кГц и разрядностью 16 бит в формате WAV с использованием встроенного накопителя объемом 8 Гб и внешней карты памяти объемом до 32 Гб, что эквивалентно приблизительно 50-ти часам непрерывной записи. При помощи данного устройства в 2023 году во время серии экспедиций в полевых условиях были получены непрерывные акустические записи процесса эмиссии пузырькового газа в бухте Ласпи (южный берег Крыма) [3]. Питание устройства осуществлялось от двух аккумуляторов 1.2 В, 950 мАч, что ограничило продолжительность записи до 17 часов. Увеличение емкости аккумуляторной батареи и расширение памяти устройства позволит получать более продолжительные записи.

Полевые испытания устройства в 2023 году были проведены за счет гранта Российского научного фонда No 23-27-00379, <https://rscf.ru/project/23-27-00379>.

Список литературы

- 1) Vazquez A., Manasseh R., Chicharro R. Can acoustic emissions be used to size bubbles seeping from a sediment bed? // Chemical Engineering Science. 2015. V. 131. P. 187–196.
- 2) Longo M., Lazzaro G., Caruso C.G., Radulescu V., Radulescu R., Sciré Scappuzzo S.S., Biro D., Italiano F. Black Sea Methane Flares From the Seafloor: Tracking Outgassing by Using Passive Acoustics. // Front. Earth Sci. 2021. 9: 678834.
- 3) Будников А.А., Иванова И.Н., Хурчак А.И., Малахова Т.В. Мониторинг пузырьковых метановых газовыделений и гидрологических параметров в бухте Ласпи (Крым) // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2023. Т. 78. №4. 2340901.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ ИНТЕРВЕНЦИОННЫХ АНПА

Юрманов А.П., Коноплин А.Ю., Панчук М.О.

Институт проблем морских технологий им. академика М.Д. Агеева Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

Ключевые слова: необитаемый подводный аппарат, многозвенный манипулятор, система технического зрения, манипуляционные операции, поддержка деятельности операторов

Разработка интервенционных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), оснащенных многозвенными манипуляторами (ММ), является перспективной задачей для многих научных коллективов, занимающихся подводной робототехникой. На сегодняшний день уже разработаны подходы к созданию систем связи, навигации и управления интервенционными АНПА [1, 2]. Однако для того, чтобы такие аппараты начали активно использоваться для исследования и освоения Мирового океана, еще предстоит решить большое количество научных и технических проблем.

Для выполнения подводных операций в открытом море в первую очередь необходимо обеспечить устойчивую навигацию и канал связи АНПА с судовым постом оператора, для этого нужно решить проблему управления согласованными перемещениями АНПА и судна-носителя, при которых АНПА будет находиться в зоне действия гидроакустической системы связи и навигации с ультракороткой базой (ГАСНС УКБ). Кроме того, выполнение сложных и ответственных манипуляционных операций АНПА в автономном режиме затруднено из-за сложности идентификации целевых объектов в неопределенной окружающей среде [3]. В таких случаях необходимы контроль и целеуказание со стороны оператора, реализуемые посредством ГАСНС УКБ. При этом этапы операции, которые не могут быть проконтролированы оператором из-за ограничений в скорости передачи данных, должны выполняться АНПА в автономном режиме.

Для успешного решения обозначенных проблем в работе ставится задача разработки, программной реализации и испытаний системы поддержки деятельности операторов АНПА, обеспечивающей эффективное выполнение манипуляционных операций с помощью АНПА с ММ в супервизорном режиме с использованием канала связи ГАСНС УКБ. Эта задача решается в три этапа.

Во время поиска объекта работ, а также в процессе выполнения манипуляционной операции в супервизорном режиме управления необходимо, чтобы АНПА имел устойчивую связь с судном-носителем. Для этого разработанный алгоритм отслеживания нахождения АНПА в зоне действия ГАСНС УКБ и согласованного управления движением судна-носителя и аппарата позволяет в режиме реального времени вычислять желаемое положение АНПА относительно судна и формировать предупреждения, подсказки и рекомендации для оператора АНПА и судоводителей. В результате в процессе выполнения миссии АНПА обеспечиваются требуемые для супервизорного режима управления показатели качества работы ГАСНС УКБ.

Для супервизорного выполнения манипуляционных операций предложен метод, позволяющий на основании данных, полученный от бортовых СТЗ, автоматически идентифицировать объект работ, сблизиться с ним и сформировать желаемую траекторию движения рабочего инструмента ММ. Перечисленные вычисления выполняются на бортовом компьютере АНПА. Поскольку автоматическая идентификация не может гарантировать правильное определение заранее известного объекта, предложенный метод предполагает отправку на пост оператора набора данных, состоящего из оценки точности распознавания объекта, анализа его деформации и заливания, а также наборов точек траекторий ММ, спроецированных на реальную поверхность целевого объекта. Причем указанные данные адаптивно интерпретируются для достижения объема, допустимого к

передаче с учетом текущей скорости канала связи. На основании полученной информации, которая отображается на специальном графическом интерфейсе с цифровым двойником АНПА, оператор отправляет наборы команд для перехода между этапами выполнения операции (подтвердить и продолжить, повторно идентифицировать, запросить дополнительные данные, отменить и др.). В результате оператор получает возможность контролировать процессы выполнения операции и формировать целеуказания для АНПА с ММ.

После получения от оператора команды для выполнения операции АНПА начинает обрабатывать манипулятором желаемую траекторию в режиме стабилизируемого зависания [4]. Этот процесс не может контролироваться оператором в режиме реального времени из-за длительных задержек в передаче информации через ГАСНС УКБ. Для выполнения операции в автоматическом режиме с требуемой точностью предложен метод корректирования траекторий ММ и навигационной информации АНПА. Для этого используется специальный графический маркер, закрепленный на рабочем инструменте манипулятора. Путем сравнения пространственного положения маркера, идентифицированного с помощью СТЗ, с положением, рассчитанным с помощью решения прямой задачи кинематики для этого ММ, вычисляется вектор ошибки, вызванной ограниченной точностью СТЗ. Этот вектор позволяет в режиме реального времени устранить ошибку определения положения и ориентации АНПА, а также корректировать траекторию движения рабочего инструмента ММ.

Для проверки работоспособности синтезированной системы были проведены бассейновые испытания манипуляционного комплекса, состоящего из ММ и СТЗ. В ходе выполнения эксперимента удалось идентифицировать заранее известный подводный объект, определить места заиливания и выполнить манипуляционную операцию, имитирующую очистку. Процесс выполнения операции контролировался оператором с помощью специального графического интерфейса, а также в автоматическом режиме выполнялась корректировка траектории ММ. Успешное проведение подводных бассейновых испытаний подтвердило высокую эффективность системы. На данный момент система готовится для внедрения и тестирования с АНПА ММТ-3500 разработки ИПМТ им. академика М.Д. Агеева ДВО РАН.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10038, <https://rscf.ru/project/23-71-10038/>

Список литературы

- 1) Billings G. Visual Methods Towards Autonomous Underwater Manipulation (Doctoral dissertation). 2022. P. 139
- 2) Morgan E., Carlucho I., Ard W., & Barbalata, C. Autonomous Underwater Manipulation: Current Trends in Dynamics, Control, Planning, Perception, and Future Directions. Current Robotics Reports. 2022. № 3 (4), P. 187-198
- 3) Rizzini, D. L., Kallasi, F., Aleotti, J., Oleari, F., & Caselli, S. (2017). Integration of a stereo vision system into an autonomous underwater vehicle for pipe manipulation tasks. Computers & Electrical Engineering. 2017. Vol. 58, P. 560-571.
- 4) Konoplin A., Yurmanov A., Krasavin N., Piatavin P. Development of a control system for multilink manipulators on unmanned underwater vehicles dynamically positioned over seafloor objects // Applied Sciences. 2022. № 3 (12). P. 1666