

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. Ширшова РАН
МГТУ им. Н.Э.Баумана
НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**XVIII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**



**«СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ»
(МСОИ-2023)**

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

**В двух томах
Том II**

МОСКВА 2023

На первой странице обложки представлена трехмерная модель автономной донной станции экологического контроля с береговым энергетическим комплексом

УДК 551.46.07

ББК 26.221

«Современные методы и средства океанологических исследований» (МСОИ-2023) / Материалы XVIII международной научно-технической конференции. Том II. – М.: Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, 2023. – 280с.

ISBN 978-5-6045110-9-1

DOI 10.29006/978-5-6045110-9-1-2023

Книга содержит материалы конференции МСОИ-2023. В сборнике представлены доклады ученых-океанологов, инженеров, аспирантов и студентов, посвященные современным технологиям исследований природы Мирового океана в связи с наиболее актуальными фундаментальными проблемами океанологии.

В томе II рассмотрены современные методы и средства гидрофизических исследований, методы и средства морских геологических, геофизических и ресурсных исследований, а также результаты применения современных информационных технологий. Анализ и решение перечисленных задач обсуждаются на общем фоне актуальности исследований Арктических регионов России.

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Редактирование :Н.А. Римский-Корсаков, Н.Ф. Тихонова

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН на 2021 год (тема FMWE-2021-0010) и проекта РНФ №23-17-00156

“Modern methods and means of oceanological research”. Proceedings of the XVIII International Conference MSOI-2023, Vol. II. – Moscow: Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 2023. –280p

This publication contains materials of the MSOI-2023 conference. The book contains ocean scientists, engineers, graduate students and students reports on modern technologies for studying the nature of the World Ocean in connection with the most actual fundamental oceanology problems.

In volume II, modern methods and means of hydro physical research are considered, as well as methods and means of marine geological, geophysical and resource research. as well as the results of the application of modern information technologies. The analysis and solution of the listed tasks are discussed in connection with the general background of the Russian Arctic research relevance.

ББК 26.221

ISBN 978-5-6045110-9-1

© ИОРАН 2023

ОРГКОМИТЕТ МСОИ-2023

1. Соков А.В. председатель, чл. корр. РАН директор ИОРАН
2. Римский-Корсаков Н.А. зам. председателя, д.т.н., зам. директора ИОРАН
3. Вельтищев В.В. сопредседатель д.т.н., зав. каф. МГТУ им. Н.Э. Баумана
4. Островский А.Г. к.г.н., вед.н.с. ИО РАН
5. Мокиевский В.О. д.б.н., вед.н.с. ИО РАН
6. Глуховец Д.И. к.г.н., вед.н.с. ИО РАН
7. Егоров А.В. к.г-м.н., зав. лабораторией ИО РАН
8. Свиридов С.А. к.т.н. зав. отделом инф. технологий ИОРАН
9. Кикнадзе О.Е. заведующий лабораторией, НИЦ "Курчатовский институт"
10. Уманская И.А. глав. спец. отдела информационных технологий
11. Тихонова Н.Ф. н.с., секретарь конференции

Координационная рабочая группа:

Научн.сотр. Пронин А.А., вед.инж. Водяная Е.Г., ст. инж. Ёлкина М.М., вед.инж. Соколов А.А., Муратов А.В, Куликова Т.А., вед.инж. Марин В.М., инж. Белевитнев Я.И., Муровья В.О., Лесин А.В.

Конференция проводится при финансовой поддержке Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Московского государственного технического университета им.Н.Э.Баумана, РНФ проект 23-17-00156

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ МСОИ-2023

- | | | |
|----|----------------------------|--|
| 1 | Соков А.В. | чл. корр. РАН директор ИОРАН, председатель |
| 2 | Римский-
-Корсаков Н.А. | д.т.н., заместитель директора по морской технике ИО РАН, сопредседатель |
| 3 | Нигматулин Р.И. | академик РАН, научный руководитель ИО РАН, сопредседатель |
| 4 | Лобковский Л.И. | академик РАН, научный руководитель геологического направления ИОРАН |
| 5 | Флинт М.В. | академик РАН, научный руководитель направления «Экология морей и океанов» ИО РАН, |
| 6 | Верещака А.Л. | чл. корр. РАН, руководитель лаборатории ИОРАН |
| 7 | Гулев С.К. | чл.-корр., руководитель лаборатории ИОРАН |
| 8 | Завьялов П.О. | чл.-корр. РАН, заместитель директора ИО РАН, |
| 9 | Книгель Н.Я. | заместитель начальника Управления по нераспространению и физической защите НИЦ «Курчатовский институт» |
| 10 | Вельтищев В.В. | д.т.н., зав. кафедрой МГТУ им. Н.Э.Баумана |
| 11 | Шевченко В.В. | к.г-м т.н. зам. дир. ИО РАН, |
| 12 | Каевицер В.И. | д.т.н, ФИРЭ им. Котельникова РАН |
| 13 | Вялышев А.И. | д.ф.-м.н., главный научный сотр. ВНИИ ГОЧС МЧС РФ |
| 14 | Сагалеви́ч А.М. | д.т.н., зав. лаб. ИО РАН, Герой России |
| 15 | Мотыжѐв С.В. | д.т.н., руководитель научного направления МГИ, Севастополь |
| 16 | Добролюбов С.А. | чл.-корр., декан факультета МГУ |
| 17 | Вязилов Е.Д. | д.т.н., зав. лаб. ЦОД ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» Росгидрометцентра, Обнинск |
| 18 | Казеннов А.Н. | Руководитель лаборатории НИЦ «Курчатовский институт» |

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГИДРОФИЗИКА

Крупномасштабные фронтальные зоны в толще вод Северной Атлантики Перескоков А.И.....	10
Опыт использования океанографических данных ежегодных площадных съежек Норвежского моря как альтернативу стандартным разрезам Сентябов Е.В.....	12
Климатические изменения основных гидрометеорологических параметров западной части российской Арктики в 1980-2021 годы Серых И.В., Толстиков А.В.....	16
Внутренние гравитационные волны в океане при обтекании стратифицированным сдвиговым течением подводной горы Булатов В. В., Владимиров И. Ю.....	20
О возможности улучшения качества изображения при дистанционном зондировании водной поверхности Булатов В. В., Пономарев А. Н.....	25
Термохалинные индексы Баренцева моря Трофимов А.Г.....	29
О течениях и долгопериодных волнах Мирового океана и их измерениях Бондаренко А.Л.....	33
Внутригодовые колебания уровня моря и синоптическая энергетика субарктической части Японского моря Трусенкова О.О.....	39
О физической модели современного климата Бышев В.И., Гусев А.В., Сидорова А.Н.....	43
Волновая природа течений в океанах и морях Щевьев В. А.....	46
Физические процессы в длиннопериодных волнах. (Пространственно- временная изменчивость) Щевьев В. А.....	50
Пространственно-временная изменчивость и характеристики субмезомасштабных вихрей в Черном море Кубряков А.А., Алескерова А.А., Пузина О.С., Мизюк А.И., Лишаев П.Н., Медведева А.В., Плотников Е.В., Чепыженко А.И., Зацепин А.Г., Станичный С.В.....	55
Природа, причины и последствия для окружающей среды глобального изменения климата. Подымов И.С., Подымова Т.М.....	56
Особенности проявления внутренних волн на оптических и радиолокационных изображениях Медведева А. В. , Станичный С. В., Булатов В. В.....	60

Особенности проявления интенсивного развития кокколитофоров в Мраморном море по данным дистанционного зондирования	
Медведева А. В., Станичный С. В.....	64
Диагностика пузырьковых облаков в море методами нелинейной нестационарной спектроскопии	
Буланов А.В, Соседко Е.В.....	68
Исследования гидрофизических и спектральных характеристик морской воды с применением автоматизированного комплекса	
Буланов А.В.....	72
Получение характеристик субмезомасштабных динамических процессов вызванных потоком речного плома по данным оптической съемки с беспилотных летательных аппаратов	
Новиков Б.А.,Кубряков А.А.....	76
Лабораторное исследование эволюции нефронтальных вихрей в двухслойной вращающейся жидкости	
Елкин Д.Н., Зацепин А.Г., Шварцман Д.Р.....	80
Лагранжев анализ алеутских вихрей в эпоху альтиметрии	
Пранц С.В., Будянский М.В. Улейский М.Ю.....	84
Методика и результаты интеркалибровки прозрачномеров ПУМ-200 и LISST-Тauf	
Артемьев В.А., Глухов В.А., Глитко О.В., Павлова М.А. Клювиткин А.А.....	88
О динамике вод в южной части Карского моря	
Амбросимов А.К., Витинг К.Б., Демешко Д.М., Швед В.А.....	92
Изменчивость гидрологических характеристик и переноса водных масс в желобе Святой Анны	
Амбросимов А.К., Ковалев Г.А., Пронина Ю.О.....	95
Лабораторные исследования приповерхностной конвекции	
Куприянова А.Е., Гриценко В.А.....	99
Автономный многочастотный измеритель обратного акустического рассеяния AQUASOUND	
Соловьев В.А.....	103
Исследование гидрофизической изменчивости акватории на шельфе Абхазии летом 2021 г.	
Химченко Е.Е., Серебряный А.Н., Попов О.Е., Белов Д.В., Тарасов Л.Л., Нешенко И.П., Кенигсбергер Г.В.....	107
«Прямоугольные» и другие нелинейные внутренние волны на северо-западном шельфе Австралии	
Серебряный А.Н., Holloway Р.Е.....	111
Исследование вертикального профиля подводных течений озера Байкал	
Колигаев С.О.....	115

Измерения коэффициента яркости моря с помощью макета палубного спектрорадиометра	
Павлова М.А., Глуховец Д.И., Дерягин Д.Н., Круглинский И.А.....	119
Анализ распределения частоты Вьясяля-Брента в циклонах и антициклонах Лофотенской котловины	
Новоселова Е.В., Белоненко Т.В., Жмур В.В.....	123
Спектральная структура колебаний течений в Карском море к западу от полуострова Ямал	
Амбросимов А.К., Мельников В.А.....	127
Региональный алгоритм спутниковой солености поверхности океана для морей российской Арктики	
Криницкий М.А., Савин А.С., Осадчиев А.А.....	131
Усвоение спутниковых данных по температуре поверхности моря и сплоченности ледяного поля в модели INMOM для акватории Западно-Арктических морей России	
Панасенкова И.И., Фомин В.В., Дианский Н.А.....	133
Методы выделения когерентных структур в данных численного моделирования атмосферы над океаном	
Кошкина В.С., Гавриков А.....	138
Оценка погрешности определения плотности морской среды с помощью гидростатического метода при неконтролируемой ориентации измерителя.	
Федотов Г.А.....	144
Моделирование кипрских топографических вихрей над особым подводным препятствием	
Егорова В.М.....	148
Влияние даунвеллинга на утечку топлива с затонувшего теплохода «Адмирал Нахимов»	
Мысленков С.А., Кучейко А.А., Козырева А.Ю., Коваль Г.Я.....	151
Численное моделирование динамики пассивной примеси в поверхностном и подповерхностном слоях в потоке над подводной возвышенностью в океане	
Шатохин М.В.....	157
Влияние типа суровости зим на интегральные характеристики холодного промежуточного слоя Балтийского моря	
Лобчук О.И., Буканова Т.В., Чубаренко И.П.....	161
Инерционные колебания течений по данным измерений IN SITU и в модели DieCAST	
Мельников В.А., Коротенко К.А.....	163
Спектры давления и течений в бухте Круглая (г. Севастополь) в июле-августе 2022 г	
Багаев А.В., Шутов С.А., Щербаченко С.В., Удовик В.Ф.....	167

Океанографические факторы, определяющие динамику ледяного покрова в морях российской арктики	
Степанов В.В., Старов К.Г., Павлова Е.А.....	170
Исследование динамики Гольфстрима с помощью вихреразрешающего численного моделирования и аналитического подхода	
Дианский Н.А. Жмур В.В., Гусев А.В.....	174
Четырехканальный проточный спектральный флуориметр.	
Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А., Аглова Е.А., Володин В.Д., Белевитнев Я.И., Венцкут Ю.И.....	178
Способ оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии в Черном море по тонкоструктурным данным ctd-зондирования	
Зацепин А.Г., Подымов О.И., Островский А.Г.....	182
Физическая природа тонкоструктурного расслоения вод океана	
Зацепин А.Г., Герасимов В.В.....	186

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, РЕСУРСЫ.

О методе статистического анализа рельефа и геофизических данных на примере Азиатско-Тихоокеанского сочленения	
Мельниченко Ю.И., Лепешко В. В., Ли Н. С.....	190
Об определении магнитуд землетрясений по записям донных сейсмографов	
Ковачев С.А., Крылов А.А., Егоров А.В.....	194
Сейсмическая опасность Печорского моря с учетом палеоземлетрясений	
Ковачев С.А., Либина Н.В., Мутовкин А.Д.....	198
Система оперативного мониторинга сейсмической и цунами опасности с использованием стационарных стабилизированных буев	
Левченко Д.Г.....	202
Развитие в кайнозой океанической коры котловины Нансена (Северный Ледовитый океан)	
Шрейдер А. А., Сажнева А. Э., Клюев М. С., Бреховских А. Л.....	206
Применение морфометрических методов для выделения разломов на шельфе Печерского моря	
Либина Н.В., Ковачев С.А.....	208
Динамика рСО ₂ в поверхностном слое вод Черного моря по данным 2015 – 2021 гг	
Орехова Н.А, Медведев Е.В.....	212
Анализ многолетней динамики содержания нефтеуглеводородов в заливе Грен-фьорд (Западный Шпицберген)	
Александрова А.Г., Демешкин А.С., Александрова Н.В.....	216
О динамике подъема пузырьков метана из морских недр	
Амбросимов А.К.....	220
Изучение повторно-жильного льдообразования в прибрежно-морских условиях Карского шельфа с использованием космических данных	

Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И.....	224
Роль математического моделирования в изучении мерзлых пород и истории геологического развития Арктического шельфа	
Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А.....	228
Использование акустических методов для мониторинга процессов газовой эмиссии в морях арктического шельфа	
Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В., Мороз Е.А.....	231
Прямой метод определения гранулометрического состава в субмикронном диапазоне размеров	
Ревунова А.В.....	235
Сейсмоакустические исследования осадочной толщи и рельефа дна южного шельфа Крыма в 124 рейсе нис «Профессор Водяницкий»	
Пронин А.А., Хортов А.В., Мутовкин А.Д., Римский-Корсаков Н.А.....	238
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
О создании цифрового двойника океана	
Вязилов Е. Д., Михеев А. С., Мельников Д. А.....	243
О мониторинге циклонической активности в Северной Атлантике на основе показателей ЕСИМО. Вязилова Н.А.....	
	247
Использование разных типов океанографической информации в целях научного оперативного сопровождения промысла пелагических видов рыб в северо-западной части Тихого океана	
Устинова Е.И., Филатов В.Н., Басюк Е.О.....	251
Алгоритм автоматизированной оценки палеоиндикаторов по микрофотографиям осадочных пород с применением современных методов глубокого обучения	
Голиков В.А., Криницкий М.А., Борисов Д.Г.....	255
Идентификация аномалий в высокочастотных временных рядах измерений скорости ветра и концентрации парниковых газов с применением современных методов машинного обучения	
Касаткин А.Я., Криницкий М.А., Гулев С.К.....	259
Исследование чувствительности алгоритма усвоения спутниковых и контактных данных температуры поверхности моря в модели inport, реализованной для акватории Охотского и Японского морей	
Фомин В. В., Панасенкова И. И., Дианский Н. А.....	263
Новый алгоритм обработки данных для УКБ антенн	
Носов А.В., Тихонова Н.Ф.....	267
Корреляция звука, отраженного морской поверхностью	
Носов А.В., Тихонова Н.Ф.....	269
Комплексное информационное поле придонного пространства	
Нерсесов Б.А., Римский- Корсаков Н.А.....	273

ГИДРОФИЗИКА

УДК 551.465.4

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ФРОНТАЛЬНЫЕ ЗОНЫ В ТОЛЩЕ ВОД СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ

Перескоков А.И.

*Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеорологической информации-Мировой центр данных,
ул. Королева, 6, 249035, г. Обнинск Калужской обл.,
8(48439)74-131, peres@meteo.ru*

LARGE-SCALE FRONTAL ZONES IN THE WATER COLUMN OF THE NORTH ATLANTIC

Pereskokov A.I.¹

¹ *All-Russian Research Institute of
Hydrometeorological Information-World Data Center,
6, Korolov str., Obninsk, Kaluga reg., 249035*

Глобальные фронты в толще вод Северной Атлантики можно подразделить на три типа: вертикального фронтогенеза за счет двойной диффузии в режиме солевых пальцев, горизонтального фронтогенеза из-за “столкновения” двух разнородных водных масс и комбинированного фронтогенеза двух названных типов.

Global fronts in the water column of the North Atlantic can be divided into three types: vertical frontogenesis due to double diffusion in the salt finger regime, horizontal frontogenesis due to the “collision” of two heterogeneous water masses and combined frontogenesis under the influence of the two above-mentioned types.

Анализ распределения максимальных термических градиентов (рассчитанных по средним климатическим данным, отнесенным к центрам одноградусных трапеций) на наиболее показательном горизонте 600 м в верхней части океанического термохалокина Северной Атлантики показывает наличие пяти фронтальных зон (для краткости фронтов) на фоне естественной климатической неоднородности температуры. Заметим, что система фронтов, связанная с подповерхностными экваториальными течениями, к глубине 600 м уже разрушается.

Если следовать с севера на юг, то первый фронт – *субполярный* (или *субарктический*) фронт – образуется на “стыке” наступающей с северо-запада холодной, слегка опресненной, слабостратифицированной и более плотной *субполярной* (*северо-атлантической*) *промежуточной водной массы* и прорывающихся с юга-запада более теплых и соленых трансформированных субтропических и склоновых вод, вносимых Северо-Атлантическим течением. Наиболее яркими особенностями субполярного фронта являются формирование так называемого “Северо-западного угла” фронта, определяемого рельефом дна на 38–42° з.д., и его раздвоение на 27° з.д. после пересечения Срединно-Атлантического хребта.

Второй фронт – *средиземноморский фронт* – связан с усилением, по сравнению с вышележащими слоями, адвективного воздействия *верхней средиземноморской промежуточной водной массы* (*ВСрПВ*). Этот фронт формируется на границах *ВСрПВ*, которая спускается с европейского континентального склона и в дальнейшем горизонтально продвигается в виде широкого (34–47° с.ш.) и раздваивающегося на конце интрузионного “языка”.

Третий фронт – *субтропический фронт* – оконтуривает горизонтальный срез океанического термохалоклина, который занимает обширную область в пределах субтропической антициклонической системы и своим происхождением и поддержанием обязан эффективному вертикальному тепло- и массопереносу за счет пальцевой конвекции [1]. Наиболее важной специфической особенностью субтропического фронта в районе “дельты Гольфстрима” (разветвления его на отдельные струи и перехода в Северо-Атлантическое течение) является то, что на его формирование здесь накладывается зональный фронтогенез. Такая комбинация вертикального и горизонтального фронтогенезов приводит к весьма своеобразной и нестабильной по глубине конфигурации этой части субтропической фронтальной зоны.

Четвертый фронт – *фронт Саргассова моря* – обнаруживается внутри толщи вод океанического термохалоклина. Этот вытянутый вдоль Гольфстрима и систематически смещающийся в толще вод фронт с умеренными перепадами температуры и солености поперек фронта формируется на восточной стороне “языка”, выделяющего самые теплые и соленые воды Саргассова моря. В поддержании фронта Саргассова моря, помимо эффекта адвекции вод, важную роль играет пространственно неоднородное перераспределение тепла и солей, накопленных в поверхностных водах, вглубь за счет выпадения солевых пальцев.

Пятый фронт – *тропический фронт* – образуется в области взаимного перекрытия *субтропической подповерхностной промежуточной водной массы* (*СубтрППВ*) и *антарктической промежуточной водной*

массы (ААПВ). Своим происхождением тропический фронт обязан конвективной неустойчивости из-за двойной диффузии в форме солевых пальцев. Весьма благоприятные условия для вертикального переноса и создания горизонтального контраста температур здесь явно связаны с наличием резкого подповерхностного максимума солености на глубинах от 75 м (и менее у побережья Африки) до 125–150 м (вблизи Малых Антильских островов) в ядре *СубтрППВ* и хорошо выраженного промежуточного минимума солености в диапазоне глубин 800–1000 м в ядре *ААПВ*. Перепад солености между ядрами этих перекрывающихся водных масс, достигающий 2.5 psu, обеспечивает достижение плотностным соотношением на глубинах выше минимума солености значений, меньших, чем $R_{\rho}^{sp} \leq -0.52$, и вполне предсказуемые эффекты: интенсивное “выпадение пальцев”, существенный перенос тепла и солей сверху вниз и формирование трансформированных вод, отделяющихся от фоновых со всех сторон внешним фронтом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перескоков А.И. Влияние конвекции в режиме солевых пальцев на структуру океанического термохалокина // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 6. С. 913-919. DOI: 10.31857/S0030-1574596913-919.

УДК 551.46.06 (268.43)

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЕЖЕГОДНЫХ ПЛОЩАДНЫХ СЪЕМОК НОРВЕЖСКОГО МОРЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВУ СТАНДАРТНЫМ РАЗРЕЗАМ

Сентябов Е.В.

Полярный филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича), ул. Академика Книповича, д.6, 183038, г. Мурманск, 8(8152)402607, sentyab@pinro.ru

**EXPERIENCE OF USING OCEANOGRAPHIC DATA FROM ANNUAL
AREA SURVEYS IN THE NORWEGIAN SEA AS AN ALTERNATIVE TO
STANDARD SECTIONS**

Sentyabov E.V.

*Polar Branch of FSBSI «Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography» («PINRO» named after N.M. Knipovich),
6, Akademik Knipovich Str., Murmansk, 183038*

В работе показано, что океанографические данные ежегодных площадных съемок Норвежского моря, осредненные в «боксах», хорошо применимы для оценки многолетней изменчивости термических условий вод атлантического и субарктического происхождения при отсутствии наблюдений на стандартных разрезах.

The paper presents that box-averaged oceanographic data from annual area surveys in the Norwegian Sea are well applicable for estimation of the long-term variability of the thermal conditions of Atlantic and Subarctic waters in the absence of observations on standard sections.

С середины 50-х гг. XX века на акватории Норвежского моря ПИНРО ежегодно проводил летние океанографические съемки на стандартных разрезах, охватывая практически все море. На основе данных этих разрезов оценивалась межгодовая изменчивость теплового состояния вод того или иного происхождения [1].

К сожалению, в середине 2000-х годов отечественные океанографические исследования на разрезах в Норвежском море полностью прекратились, и вся информация о термохалинном состоянии вод в регионе, поступала лишь с иностранных судов, участвующих в ежегодных международных площадных экосистемных съемках. Отличием этих съемок от стандартных разрезов является то, что исследования на акватории выполняются рандомизированно на квазиширотных галсах [2], не позволяющих каждый год получать информацию в одних и тех же точках.

Основной целью работы является оценка применимости данных ежегодных площадных съемок Норвежского моря, приведенных в узлы регулярной сетки, для характеристики многолетней изменчивости водных масс различного происхождения в описываемом бассейне.

В работе использованы океанографические данные с судов, участвующих в съемках пелагических рыб Норвежского моря, проводимых в рамках международных экосистемных съемок северных морей, выполненных в мае 2000-2021 гг. Все суда, участвовавшие в съемках, работали по единой методике, океанографические измерения выполняли с помощью одинаковых моделей CTD зондов (в последнее десятилетие это SBE 911). Для исследования выбраны горизонты 0, 50, 100 и 200 м. Данные

каждой съемки с помощью пакета Surfer были приведены в узлы регулярной сетки с шагом 1° по долготе и $0,5^\circ$ по широте. Для исследования были выбраны «боксы», температура в которых могла бы описывать межгодовые изменения в атлантических и субарктических водных массах. Для атлантических вод – это трапеция, ограниченная $2-6^\circ$ в.д. и $65-68^\circ$ с.ш. (близкая по положению к участкам, описывающим Восточную ветвь Норвежского течения на стандартных российских разрезах по $65^\circ 45'$ с.ш. и $67^\circ 30'$ с.ш., а также находящаяся в пределах «ядра» атлантических вод Норвежского течения [1]), для вод Восточно-Исландского течения – трапеция, ограниченная $7-12^\circ$ з.д. и $66-68^\circ$ с.ш., в которой, согласно среднегодовым данным [1], располагается «ядро» этого течения в верхнем 200-метровом слое. Дополнительно, для сравнения, были привлечены данные о температуре вод Норвежского и Восточно-Исландского течений на разрезах, выполняемых по национальным программам Норвегии, Великобритании и Исландии, взятые из базы данных Рабочей группы ИКЕС по океанической гидрографии [3].

Используемые в работе «боксы» могут объективно характеризовать межгодовые изменения теплового состояния вод различного происхождения. На рис. 1 представлены области значимых коэффициентов корреляции между температурой в каждом узле регулярной сетки на выбранной акватории и осредненной температурой в «боксах», соответствующих водам Восточно-Исландского и Норвежского течений на различных горизонтах.

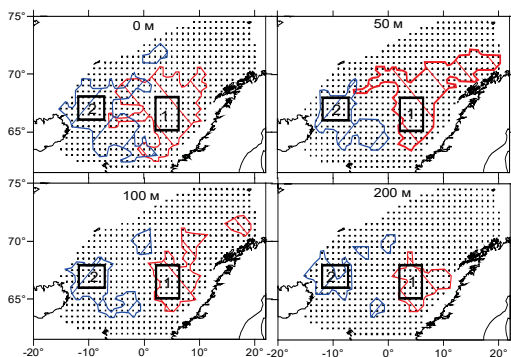


Рис. 1. Распределение значимых коэффициентов корреляции ($r \geq 0,55$, $p = 0,01$) температуры воды в узлах регулярной сетки в Норвежском море с осредненной температурой в «боксах», характеризующих атлантические (1 – красные области) и субарктические (2 – синие области) воды

Так, температура вод в выбранном нами «боксе» 1 достаточно тесно ($r = 0,60-0,62$) коррелирует с температурой атлантических вод в слое 0-200 м на норвежском разрезе «Гимсёй» и на британском разрезе через Фареро-Шетландский канал ($r=0,55$). Значима ($r = 0,55-0,64$) корреляционная связь температуры в «боксе» 2 с температурой холодных восточно-исландских вод на исландском разрезе «Ланганес». Интересно, что температура субарктических вод в «боксе» 2 имеет тесную прямую связь с теплосодержанием вод Норвежского моря в слое 0-800 м для обширной акватории от 62 до 75 °с.ш. [3] ($r = 0,60-0,74$). Значимая же корреляционная связь между температурой в обоих «боксах» отсутствует.

На рис. 2, для примера, представлены межгодовые изменения нормированных аномалий температуры воды в наших «боксах» на горизонтах 50 и 200 м. В целом, за рассматриваемые 22 года XXI века для атлантических вод верхнего 50-метрового слоя можно выделить достаточно продолжительные теплый (с преобладаниями положительных аномалий – 2002-2009 гг.) и холодный (с преобладанием отрицательных аномалий – 2012-2021 гг.) периоды. С глубиной холодный период сократился до 2015-2020 гг. Интересно, что для Баренцева моря локальные минимумы и максимумы климатического индекса, включающего температуру воды, воздуха и ледовитость [4] в XXI веке происходили с запаздыванием на 2 года относительно минимумов и максимумов температуры атлантических вод в Норвежском море.

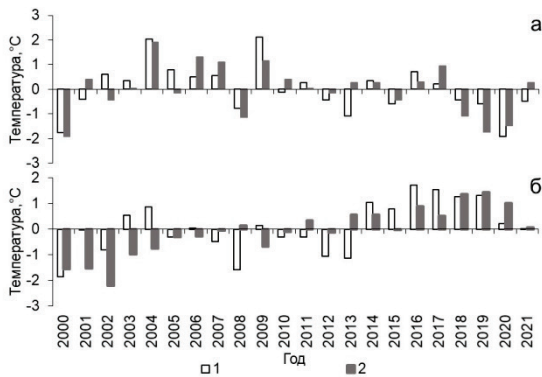


Рис. 2. Нормированные аномалии температуры воды на горизонтах 50 (1) и 200 (2) м в «боксах», характеризующих тепловое состояние атлантических (а) и субарктических (б) вод в мае 2000-2021 гг.

Для субарктических вод холодные периоды приходились на 2000-2003 и 2005-2013 гг. для верхнего 50-метрового слоя и 2000-2010 гг. для

более глубоких вод, теплый период для всего 200-метрового слоя – на 2013-2020 гг. Это согласуется с результатами анализа данных зарубежных разрезов, что говорит о возможности использовании нашего подхода к оценке межгодовой изменчивости термических условий Норвежского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сентябов Е.В. Закономерности пространственного распределения термохалинных характеристик на стандартных разрезах в южной части Норвежского моря / Е.В. Сентябов // Вопросы промысловой океанологии. М.: Изд-во ВНИРО. - 2010. - Вып. 7. - № 1. - С. 189-205.
2. Сентябов Е.В. Опыт использования температурно-акустических разрезов в международных экосистемных съемках для анализа распределения пелагических рыб Норвежского моря / Е.В. Сентябов // Труды ВНИРО. - 2018. - Т. 174. - С. 105-111.
3. Интернет-ресурс: <https://ocean.ices.dk/core/iroc#>. Дата 01.10.22.
4. Трофимов А.Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря / А.Г. Трофимов // Труды ВНИРО. - 2021. - Т. 186, - № 4. - С. 101-118.

УДК 551.582

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОСНОВНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ В 1980-2021 ГОДЫ

Серых И.В.^{1,2}, Толстиков А.В.³

¹ *Институт океанологии имени П. П. Шишова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01,
iserykh@ocean.ru*

² *Геофизический центр РАН, Москва*

³ *Институт водных проблем Севера Карельского научного
центра РАН, пр. А. Невского, 50, 185030, г. Петрозаводск, +7
(814-2) 57-34-60, alexeytolstikov@mail.ru*

CLIMATE CHANGES IN THE MAIN
HYDROMETEOROLOGICAL PARAMETERS OF THE
WESTERN PART OF RUSSIAN ARCTIC IN 1980-2021

Serykh I.V.^{1,2}, Tolstikov A.V.³

¹ *P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

² *Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences*

³ *Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk*

Исследованы климатические изменения температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра, температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности в регионе западной части российской Арктики (60°–75° с.ш., 30°–85° в.д.) за 1980–2021 гг.

Climatic changes in air temperature, precipitation, wind speed, temperature of the upper 1,5 meters of soil, thickness and area of snow cover, moisture content of the top layer of soil 1 meter thick and air humidity at a height of 2 meters from the surface in the region of the western part of the Russian Arctic (60°– 75°N, 30°–85°E) were studied for 1980–2021.

Потепление климата Арктики подтверждается изменениями основных гидрометеорологических величин атмосферы и океана за многолетний период времени, и наиболее ярко оно проявляется в последние десятилетия [1, 2]. Свидетельства этого процесса в высоких широтах: повышение температуры приповерхностного слоя атмосферы [3], сокращение площади морского льда и уменьшение его толщины, повышение температуры поверхностного слоя воды в морях, таяние многолетней мерзлоты, увеличение доли жидких осадков в течение года [4]. Таким образом, изменения климата Арктики являются важным объектом для исследования.

В нашей работе для анализа выбраны среднемесячные данные температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности, общего количества осадков за сутки, скорости ветра на высоте 50 метров от поверхности, температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и фракционной площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности из реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0.5°ш.×0.625°д. за период 1980–2021 гг.

Подтверждено существенное потепление климата западной части российской Арктики в 1980-2021 гг. Причем, наиболее сильное увеличение температуры отмечается для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов – более позднем начале зимы и раннем ее завершении [5]. Обнаружено, что в период 2001-2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Баренцева, Карского и Белого морей (Рис. 1), и этот рост происходил с ускорением. Таким образом, уменьшилась разница температуры между югом и севером западной части российской Арктики. Предположено, что одной из причин этого ускоренного роста температуры могла послужить альбедная обратная положительная связь с площадью морского льда.

Выявлено увеличение количества осадков, особенно явно проявляющееся для летнего сезона и сентября. Вызванное этим увеличение поступления пресных вод в моря способствовало распреснению и усилению стратификации верхнего слоя воды, более раннему образованию морского льда, сокращению потоков тепла из океана в атмосферу и понижению приповерхностной температуры воздуха в зимние периоды в локальных районах впадения крупных рек в Карское и Баренцево моря.

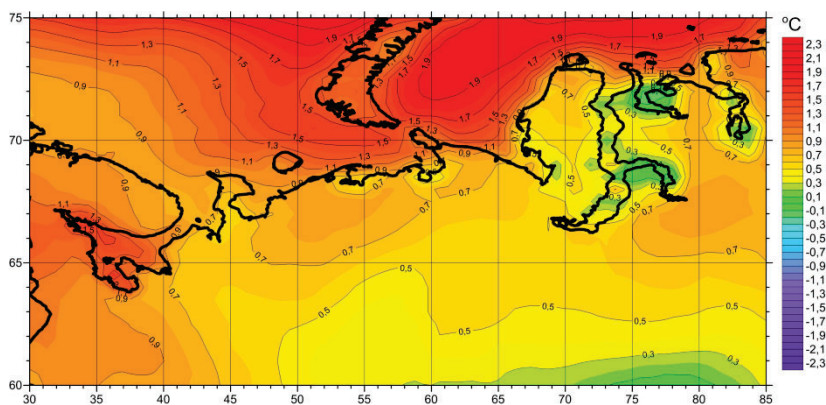


Рис. 1. Средние изменения температуры воздуха на высоте 2 метра от поверхности между периодами 1980-2000 гг. и 2001-2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2.

Обнаружено значительное изменение циркуляции атмосферы в исследуемом регионе. В зимние сезоны 2001-2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра по сравнению с 1980-2000 гг. Это могло привести к ветровому нагону морского льда с юга на север Баренцева и Карского морей, сокращению площади льда и усилению

перемешивания верхнего слоя воды на юге этих морей. В летний сезон 2001-2021 гг. произошло усиление западного ветра по сравнению с 1980-2000 гг., что способствовало усилению западного переноса тепла и влаги из Северной Атлантики в исследуемый регион.

Обнаружено повышение температуры верхних 1,5 метров почвы (ТП) в 2001-2021 гг. по сравнению с 1980-2000 гг. приблизительно на 0.5°C на западе исследуемого региона [6]. Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001-2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать $+3^{\circ}\text{C}$. В 2001-2021 гг. начался ускоряющийся рост ТП также и на северо-востоке западной части российской Арктики. Таким образом, в настоящее время на большей части исследуемого региона наблюдается ускоряющийся рост ТП, что может привести к таянию многолетней мерзлоты.

Показано сокращение толщины снежного покрова на западе и востоке исследуемого региона в 2001-2021 гг. по сравнению с 1980-2000 гг. На западе исследуемого региона также произошло существенное сокращение площади снежного покрова в ноябре и апреле. Из-за чего могла усилиться альбедная обратная положительная связь между температурой и свободной от снега поверхностью, что могло явиться одной из причин сокращения длительности зимнего сезона в западной части российской Арктики.

Рост удельной влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ВВ) начался на западе исследуемого региона, и в особенности над акваторией Белого моря, еще в 1980-2000 гг. В 2001-2021 гг. увеличение ВВ распространилось на центр и восток исследуемого региона, с наибольшей скоростью роста над акваториями морей, причем рост ВВ происходил с положительным ускорением. Вероятно, увеличение влажности воздуха над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей связано с усилением испарения с их поверхностей вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Дополнительно к росту ВВ в 2001-2021 гг. на западе и востоке исследуемого региона наблюдался еще и рост влагосодержания почвы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Serykh, I.V., Kostianoy, A.G. Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // *Ecologica Montenegrina*. - 2019. - Vol. 25. - P. 1-13.
2. Серых, И.В., Костяной, А.Г., Лебедев, С.А., Костяная, Е.А. О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое

состояние // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. - 2022. - Т. 15. - № 1. - С. 98-111.

3. Серых, И.В., Толстиков, А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестник Московского университета. Серия 5: География. – 2020. - № 4. - С. 83-95.

4. Толстиков А.В., Серых, И.В., Балаганский, А.Ф. Климатические изменения стока рек и количества осадков в регионе Белого моря // Арктика экология и экономика. - 2022. - Т. 12. - № 4.

5. Серых, И.В., Толстиков, А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2022. - Т. 68. № 3. - С. 258-277. Серых, И.В., Т

6. олстиков, А.В. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980-2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. - 2022. - Т. 68. - № 4.

УДК 532.59:534.1

ВНУТРЕННИЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В ОКЕАНЕ ПРИ ОБТЕКАНИИ СТРАТИФИЦИРОВАННЫМ СДВИГОВЫМ ТЕЧЕНИЕМ ПОДВОДНОЙ ГОРЫ

Булатов В.В.¹, Владимиров И.Ю.²

¹ *Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН,
пр.Вернадского, 101-1, 119526, г. Москва, 8(903)722-0761,
internalwave@mail.ru*

² *Институт океанологии им.П.П.Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 119997, г. Москва, 8(916)270-8520,
iyuvladimirov@rambler.ru*

Рассмотрена задача о генерации внутренних гравитационных волн, возникающих при набегании стратифицированного потока со сдвиговым течением на одиночное подводное препятствие. Предполагается, что частота плавучести постоянна, сдвиговое течение линейное и одномерное, высота обтекаемого препятствия мала по сравнению с глубиной океана. Получены интегральные представления решения при выполнении условия устойчивости

Майлса-Ховарда. Аналитически построены решения краевой спектральной задачи, которые выражаются через модифицированные функции Бесселя мнимого индекса. Приведены результаты численных расчетов возбуждаемых полей для различных волновых мод. Обсуждены особенности дисперсионных соотношений и трансформации волновых полей внутренних гравитационных волн в зависимости от параметров генерации.

The problem of generating internal gravity waves when a stratified flow with a shear flow runs into a single underwater obstacle is considered. It is assumed that the buoyancy frequency is constant and the shear flow is linear and one-dimensional. Integral representations of the solution are constructed under the Miles-Howard stability condition. The solutions of the boundary spectral problems are analytically constructed, which are expressed in terms of the Bessel functions of the imaginary index. The results of numerical calculations of dispersion curves and phase patterns of generated wave fields are presented. The transformation of the phase patterns of the internal gravity waves fields depending on the generation parameters is studied numerically.

В реальных природных стратифицированных средах (океан, атмосфера) генерация и распространение внутренних гравитационных волн (ВГВ) в значительной степени связаны с вертикальной и горизонтальной динамикой фоновых сдвиговых течений [1,2]. В океане такие течения могут проявляться, например, в области сезонного термоклина и оказывать заметное влияние на эволюцию ВГВ. В общей постановке описание динамики ВГВ в стратифицированной среде с фоновыми полями сдвиговых течений является весьма сложной задачей уже в линейном приближении. В этом случае задача сводится к анализу системы уравнений в частных производных, и при одновременном учете вертикальной и горизонтальной неоднородности эта система уравнений не допускает разделение переменных. Для исследования механизма взаимовлияния течений и ВГВ можно рассматривать различные модельные представления частоты плавучести и сдвиговых течений. Одним из заметных механизмов возбуждения ВГВ в океане можно рассматривать, например, генерацию волн фоновым (или периодическим приливным) течением на склонах поперечных хребтов в проливах и в подводных каналах. Поэтому целью настоящей работы является построение решений, описывающих генерацию ВГВ стратифицированным сдвиговым потоком, набегающим на одиночное подводное препятствие. Генерация внутренних волн и, в частности, приливных внутренних волн зависит от интенсивности фонового среднего

или периодического течения, стратификации океана, расположения подводного препятствия относительно потока и геометрии склона. Если подводный хребет перпендикулярен течению, то генерация усиливается по сравнению с расположением хребта вдоль потока. Если склон подводного препятствия близок к наклону характеристической поверхности для ВГВ заданной частоты, то это также усиливает волновую генерацию, поскольку движение частиц во внутренней волне происходит по наклонным эллипсам.

Рассматривается вертикально стратифицированный океан конечной глубины H с фоновым сдвиговым течением, набегающим на одиночную подводную возвышенность. Профиль дна описывается функцией $z = -H + h(x, y), h(x, y) \ll H$. Сдвиговое течение вдоль оси Ox - одномерное и линейное: $U(z) = a + bz$, $a = U(0) > 0, b = (U(0) - U(-H))/H > 0$. Тогда в линейном приближении и приближении Буссинеска вертикальная компонента скорости W удовлетворяет уравнению [1,3]

$$U^2(z) \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\Delta + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) W + N^2(z) \Delta W = 0, \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

где $N^2(z) = -\frac{g}{\rho_0(z)} \frac{d\rho_0(z)}{dz}$ - квадрат частоты Брента-Вяйсяля

(частоты плавучести), которая далее предполагается постоянной, g - ускорение свободного падения, $\rho_0(z)$ - невозмущенная плотность. Также выполнено условие устойчивости Майлса-Ховарда для числа Ричардсона:

$Ri = N^2 (\frac{dU}{dz})^{-2} > 1/4$. Граничное условие на поверхности: $W = 0$ при

$z = 0$. Линеаризованное граничное условие на дне: $W = U(-H) \frac{\partial h(x, y)}{\partial x}$

при $z = -H$. Решение для функции W имеет вид суммы мод

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} W_n, W_n = -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} A(\mu, \nu) B_n \cos(\mu x) \cos(\nu y) d\nu$$

$$B_n = \varphi_n(z, \mu, \nu) / \frac{\partial \varphi_n(z, \mu, \nu)}{\partial \mu}, \quad A(\mu, \nu) = \mu U(-H) S(\mu, \nu)$$

$$S(\mu, \nu) = \int_{-\infty - i0}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) \exp(i(x + \nu y)) dx dy$$

здесь $\mu = \mu_n(\nu)$, $\varphi_n(z, \mu_n(\nu), \nu)$ - собственные числа и собственные функции вертикальной спектральной задачи

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + (\mu^2 + \nu^2)(1 - (\mu U(z))^2) \varphi = 0$$

где $\varphi = 0$ при $z = 0, -H$. Собственные функции этой задачи выражаются через модифицированные функции Бесселя мнимого индекса. Асимптотический анализ интегральных представлений решения может быть проведен с помощью метода стационарной фазы (неравномерная асимптотика) или метода эталонных интегралов (равномерная асимптотика) [1,3]. Численные результаты показывают, что на фазовую структуру волнового поля вниз по потоку влияют не только параметры фонового сдвигового течения, но также геометрия обтекаемого препятствия, степень его пространственной асимметрии и угол набегания стратифицированного потока (рис.1).

Полученные результаты дают возможность эффективно рассчитывать амплитудно-фазовую структуру волновых полей, а также исследовать различные режимы волновой генерации для модельных представлений частоты плавучести и сдвиговых течений, в том числе возбуждение ВГВ при набегании фонового сдвигового течения на возвышение океанического дна сложной геометрии. Поскольку наиболее сильным генератором внутренних волн в океане является набегание приливных течений на подводный склон, то такой механизм представляется наиболее вероятным источником интенсивных внутренних волн. Генерация внутренних волн приливным течением может приводить в дальнейшем к возбуждению ВГВ более высокой частоты в арктических условиях в зависимости от разных условий среднего состояния океана [2].

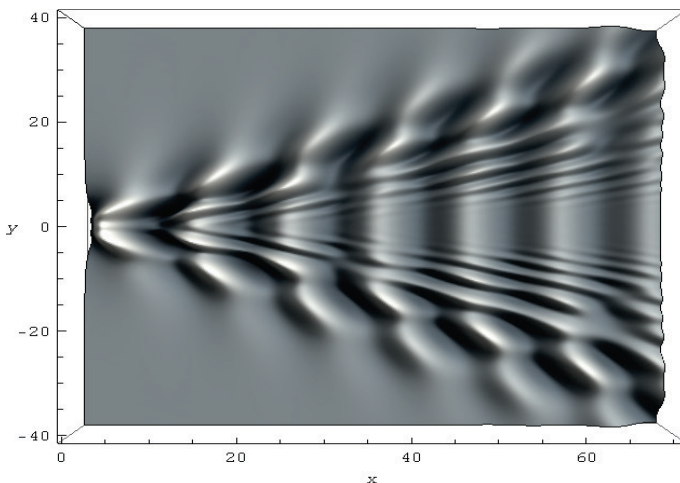


Рис. 1. Волновая картина первых трех мод при набегании сдвигового потока на подводную возвышенность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ проект №23-21-00194.

ЛИТЕРАТУРА

1. Булатов, В.В., Владимиров, Ю.В. Волны в стратифицированных средах. - М.: Наука, 2015. -735 с.
2. Morozov, E.G. Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. Berlin, Springer, 2018.. – 317 pp.
3. Булатов, В.В., Владимиров, И.Ю., Морозов, Е.Г. Генерация внутренних гравитационных волн в океане при набегании фонового сдвигового течения на подводную возвышенность // ДАН. Науки о земле. - 2022. – Т.505.- №2. - С.192-195.

О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Булатов В.В.¹, Пономарев А.Н.²

¹ *Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН,
пр.Вернадского, 101-1, 119526, г. Москва, 8(903)722-0761,
internalwave@mail.ru*

² *МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2-я Бауманская, 5-1, 105005, г. Москва,
8(985)922-7244, holodel@yandex.ru*

ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE IMAGE QUALITY DURING REMOTE SENSING OF THE WATER SURFACE

Bulatov V.V.¹, Ponomarev A.N.²

¹ *A.Yu. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy
of Sciences, 101-1 Vernadsky Ave., 119526, Moscow, 8(903)722-0761,
internalwave@mail.ru*

² *MSTU named after N.E. Bauman, 2nd Baumanskaya, 5-1, 105005,
Moscow, 8(985)922-7244, holodel@yandex.ru*

Лидары на основе твердотельных лазеров с диодной накачкой находят широкое применение при дистанционном мониторинге земной поверхности и водных сред. Добавление в измерительные системы устройства, использующее вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна, для коррекции искажений волнового фронта, возникающих при прохождении через неоднородную среду, дает возможность улучшить качество получаемого изображения при обработке волнового сигнала в реальном времени. В работе теоретически изучено влияние спонтанного рассеяния на основные характеристики параметрического возбуждения для случая многократного пересечения излучения накачки с сигнальной волной. Дана оценка уширению параметрической генерации и влиянию возбуждения необращенной волны при вынужденном рассеянии Манделъштама – Бриллюэна на чувствительность устройства. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения

качества изображений при дистанционном зондировании водной поверхности с использованием лазерных систем обнаружения.

Lidars based on diode-pumped solid-state lasers are widely used in remote monitoring of the earth's surface and water environments. The addition of a device that uses stimulated Mandelstam-Brillouin scattering to the measuring systems to correct wavefront distortions that occur when passing through an inhomogeneous medium makes it possible to improve the quality of the resulting image when processing a wave signal in real time. The influence of spontaneous scattering on the main characteristics of parametric excitation is theoretically studied for the case of multiple intersections of pump radiation with a signal wave. An estimate is given for the broadening of parametric generation and the effect of excitation of a nonreversed wave in stimulated Mandelstam – Brillouin scattering on the sensitivity of the device. The results obtained can be used to improve the quality of images in remote sensing of the water surface using laser detection systems.

В настоящее время являются актуальными задачи, предполагающие осуществление непрерывного дистанционного мониторинга состояния водной среды и таких объектов, как морские платформы и другие технологические конструкции, позволяющие в течение продолжительного времени контролировать их параметры с целью предотвращения техногенных катастроф [1,2]. Для решения этой проблемы широко используются различные лидарные системы. Применение современных твердотельных лазеров с диодной накачкой открывают широкие перспективы для информационно-измерительных систем сбора данных по измерению распределения физических величин в водном пространстве, в том числе решения проблем оперативного дистанционного зондирования морской поверхности.

Отметим, что наиболее перспективными методами контроля морских акваторий с целью обнаружения загрязнений на поверхности воды являются методы, основанные на активной лазерной локации или радиолокации водной поверхности. В этом случае не требуется естественного освещения и поэтому указанные системы могут использоваться в широком диапазоне атмосферных условий независимо от времени суток. Лидарные системы также обладают высокой пространственно-угловой разрешающей способностью, возможностью спектральной фильтрации и временного стробирования полезного сигнала на фоне помех.

Указанные свойства лидаров делают возможным проводить исследования расположенных в толще воды различных объектов в зависимости от первичных гидрооптических характеристик, состояния взволнованной поверхности воды, проводить зондирование стратифицированной толщи морской воды с целью определения параметров стратификации первичных гидрооптических характеристик, определять параметры светорассеивающих слоев воды, регистрировать поверхностные и внутренние гравитационные волны, оценивать их характеристики.

Импульсная характеристика лидара определяет пространственное разрешение лидарных измерений в зависимости от дальности, а также точность определения расстояния до обследуемых объектов. Данная характеристика является сверткой зондирующего лазерного импульса с импульсной характеристикой приемно-регистрирующей оптической системы. Современные достижения в производстве компактных твердотельных лазеров с диодной накачкой способствуют стремительному развитию оптических технологий в лазерной локации земной поверхности и водных сред.

При прохождении световой волны в природных средах (атмосфера, океан) в силу оптической неоднородности образуются искажения волнового фронта. Для устранения искажений разрабатываются различные специальные оптические системы, включающие твердотельный лазер, приемник излучения, регистрирующий световые волны, устройство коррекции волнового фронта и систему управления. Один из методов восстановления искажений волнового фронта основан на использовании эффекта обращения волнового фронта. Обращенный волновой фронт будет обратным по отношению к искаженному первичному лучу, и в результате наложения двух фронтов можно восстановить исходное изображение.

Лазерное излучение после прохождения через неоднородную среду превращается в искаженное пятно, изменяющееся со временем. Отражаясь от объекта, оно еще сильнее искажается и может накладывать серьезные ограничения на точность измерений. В случае же использования обращения волнового фронта, отраженного от объекта, излучения, направляемого обратно по тому же самому пути, при отсутствии значительных изменений условий прохождения луча за это время происходит восстановление качества пятна на объекте [3,4].

Поэтому для решения задачи исправления или восстановления волнового фронта в сложных информационных системах, требующих получения оптического изображения высокого разрешения и качества, необходимо разрабатывать соответствующие оптические устройства, способные делать компенсацию указанных искажений в режиме реального

времени. В силу последнего обстоятельства в данном случае может быть использовано явление обращения волнового фронта, использующее вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна, которое обладает малой инерционностью, удовлетворяющей поставленным требованиям.

Показано, что в случае параметрического рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в пересекающихся световых пучках можно получить высокую эффективность отражения, что имеет большое значение в случае приема слабых оптических сигналов. Применение в лидарных системах дополнительного устройства на основе параметрического вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, способного работать со слабыми отраженными сигналами дает возможность получения изображения более высокого качества. Использование многократного пересечения излучения накачки с сигнальной волной позволяет значительно усилить отраженный оптический сигнал, что открывает перспективы разработки и программной реализации эффективных алгоритмов, использующих лазерную локацию для детектирования особенностей природных сред на достаточно больших расстояниях. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения качества изображений при дистанционном зондировании земной и водной поверхностей с использованием лазерных систем обнаружения [2-4].

Работа выполнена по теме государственного задания № АААА-А20-120011690131-7 (В.В.Булатов).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Булатов, В.В., Владимиров, Ю.В. Волны в стратифицированных средах. - М.: Наука, 2015. -735 с.
2. Morozov, E.G. Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. Berlin, Springer, 2018. 317 pp.
3. Булатов, В.В., Пономарев, А.Н. О возможности улучшения качества изображения лазерной локации при дистанционном зондировании // Процессы в геосредах - 2021. – №4(30). - С.1331-1336.
4. Булатов, В.В., Пономарев, А.Н. Развитие теоретического метода в области нелинейного взаимодействия широкополосных световых волн в сложных средах // Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева, - 2021. - №3. - С.7-19

ТЕРМОХАЛИННЫЕ ИНДЕКСЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

Трофимов А.Г.

*Полярный филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ПИНРО» им. Н.М. Книповича),
ул. Академика Книповича, д. 6, 183038, г. Мурманск, 8(8152)40-26-07,
trofimov@pinro.ru*

THERMOHALINE INDICES OF THE BARENTS SEA

Trofimov A.G.

*Polar Branch of VNIRO (PINRO named after N.M. Knipovich),
6, Academician Knipovich Str., Murmansk, 183038*

В статье представлены схема расчета и обоснование выбора интегральных термохалинных индексов Баренцева моря, в качестве которых предложены средние по площади значения температуры и солености на глубине 100 м, рассчитанные на основе данных, полученных в ходе ежегодных экосистемных съемок Баренцева моря.

The paper presents a calculation scheme and justification for the choice of integral thermohaline indices of the Barents Sea, which are area-averaged temperature and salinity at a depth of 100 m, calculated using data from the annual ecosystem surveys of the Barents Sea.

Основным источником данных об океанографических условиях Баренцева моря являются ежегодные съемки запасов водных биоресурсов, в ходе которых выполняются притраловые океанографические станции и стандартные разрезы. Для исследования сезонных и межгодовых изменений океанографических условий необходимы продолжительные ряды наблюдений. Такие имеются в основном лишь для стандартных разрезов, поскольку притраловые станции в разные годы могут выполняются в разных координатах, что мешает их сравнению.

С начала 1990-х годов, после распада СССР, количество съемок и, соответственно, объем океанографических наблюдений начали сокращаться [1]. Наблюдения на многих стандартных разрезах или прекратились совсем, или стали выполняться крайне нерегулярно, в

результате чего многолетние ряды были прерваны. В настоящее время лишь по разрезу «Кольский меридиан» (вдоль $33^{\circ}30'$ в.д.) поддерживаются репрезентативные ряды данных по температуре и солености воды, но, к сожалению, и он в последние годы выполняется все реже.

Учитывая вышесказанное и принимая во внимание происходящие в последние десятилетия в Баренцевом море и в Арктике в целом значительные изменения климата [2, 3], становится очевидной необходимость поиска непрерывных рядов данных для мониторинга и оценки межгодовой изменчивости термохалинных условий Баренцева моря.

Целью данной работы является поиск интегральных и надежных, в плане непрерывности ряда, показателей для оценки межгодовых изменений термохалинного состояния вод Баренцева моря.

В работе использовались данные экосистемной съемки Баренцева моря, которая выполняется ежегодно в августе-сентябре и покрывает сеткой океанографических станций практически все море. Для изучения межгодовых изменений температуры и солености вод Баренцева моря было предложено использовать их средние по площади значения на глубине 100 м (рис. 1).

Почему средние по площади? Такие показатели могут рассматриваться как интегральные для всего Баренцева моря и позволят оценивать его состояние в целом, а не только отдельных районов. Для расчета была выбрана область в виде трапеции, ограниченной 71 и 79° с.ш., 25 и 55° в.д., которая охватывает основную часть Баренцева моря и хорошо обеспечена данными экосистемной съемки, выполняющейся в самые теплые месяцы (август-сентябрь), когда море максимально, а в последние годы полностью, освобождается ото льда.

Почему глубина 100 м? Этот горизонт залегает глубже сезонных термо- и халоклинов [4], поэтому позволяет лучше отразить межгодовые изменения исследуемых характеристик. Здесь также меньше проявляется высокочастотная изменчивость, которой в значительной степени подвержен верхний слой, т.е. это позволяет в некоторой степени нивелировать асинхронность данных съемки, выполняемой в течение примерно двух месяцев. При этом «осушка» на 100 м не столь велика как, например, на 200 м. Стоит отметить, что изначально были рассчитаны средние по площади температура и соленость для трех горизонтов (50, 100 м, придонный) и двух слоев (50-100 и 50-200 м). Однако, эти ряды оказались очень хорошо коррелируемыми между собой: коэффициенты корреляции для температуры составили 0,92-0,99 (p -value = 0,0000), для солености – 0,82-0,99 (p -value = 0,0000). Основываясь на этих результатах и

вышеизложенном, в качестве интегральных индексов были выбраны температура и соленость именно на 100 м.

Для расчета средних по площади значений вначале с помощью программы Surfer 11 данные съемки за каждый год интерполировались в узлы регулярной сетки с шагами $0^{\circ}10'$ по широте и $0^{\circ}30'$ по долоте (метод интерполяции «Kriging»). Затем на их основе рассчитывалось средневзвешенное значение с использованием в качестве веса площади области, прилегающей к узлу сетки (см. рис. 1).

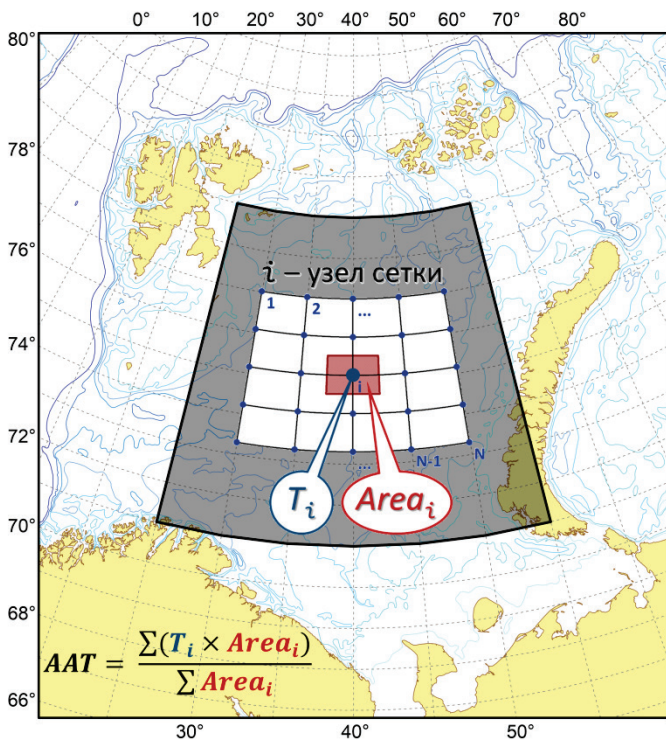


Рис. 1. Положение области, выбранной для расчета средних по площади значений температуры и солености воды, и алгоритм их расчета на примере температуры воды.

На рис. 2 видно, что с начала 1980-х годов в Баренцевом море наблюдается потепление, которое наиболее интенсивно происходило с конца прошлого века ($0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$) и достигло своего пика в 2016 г., когда

средняя по морю температура на 100 м оказалась рекордно высокой (2,82°C при норме 1,51°C за период 1981-2020 гг.), после чего, несмотря на сохранение все еще теплых условий, началась тенденция на похолодание. Соленость воды в Баренцевом море наиболее интенсивно увеличивалась с конца 1990-х годов, достигнув в 2006-2008 и 2011-2014 гг. максимальных значений 34,91-34,93 (при норме 34,84), однако с 2013 г. наблюдается ее резкое уменьшение (см. рис. 2).

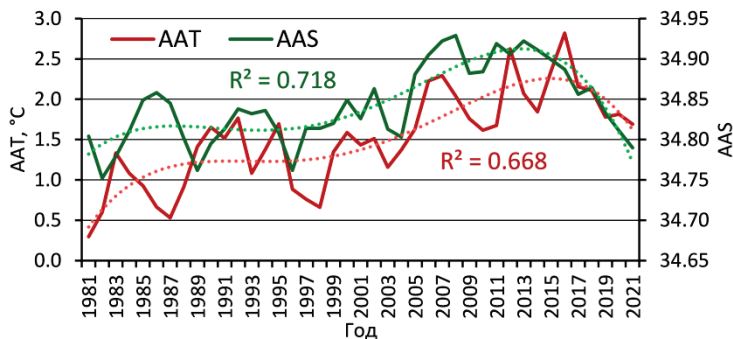


Рис. 2. Средние по площади температура (AAT) и соленость (AAS) на глубине 100 м в августе-сентябре 1981-2021 гг. Пунктирными линиями показаны полиномиальные тренды 4-й степени

Корреляционный анализ выбранных индексов с другими имеющимися в наличии термохалинными показателями (площади вод с разной температурой и соленостью, температура и соленость на разрезах) показал их согласованность и подтвердил наш выбор индексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карсаков, А. Л. 120 лет океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» / А. Л. Карсаков, А. Г. Трофимов, М. Ю. Анциферов, В. А. Ившин, М. А. Губаницев. - Мурманск: ПИПРО им. Н.М. Книповича, 2022. - 145 с.
2. Трофимов, А. Г. Современные тенденции изменения океанографических условий Баренцева моря / А. Г. Трофимов // Труды ВНИРО. - 2021. - Т. 186, № 4. - С. 101-118.
3. Карсаков, А. Л. 2016. Океанографические условия в морях Северо-Европейского бассейна и Северной Атлантики в 2014–2015 гг. и их влияние на распределение промысловых рыб / А. Л. Карсаков, В. А. Боровков, Е. В.

Сентябов, В. А. Ившин, Г. Г. Балякин, З. В. Аболмасова // Труды ВНИРО. - 2016. - Т. 164. - С. 5-21.

4. Ожигин, В. К. Воды Баренцева моря: структура, циркуляция, изменчивость / В. К. Ожигин, В. А. Ившин, А. Г. Трофимов., А. Л. Карсаков, М.Ю. Анциферов. - Мурманск: ПИИРО, 2016. - 260 с.

УДК 551.46

О ТЕЧЕНИЯХ И ДОЛГОПЕРИОДНЫХ ВОЛНАХ МИРОВОГО ОКЕАНА И ОБ ИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Бондаренко А.Л.

*Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, д. 3, 119333,
г. Москва, 8(499)135-54-56, albert-bond@mail.ru*

ON CURRENTS AND LONG-PERIOD WAVES OF THE WORLD OCEAN AND ON THEIR MEASUREMENTS

Bondarenko A.L.

*Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences,
3 Gubkin Str., Moscow, 119333*

Если какой-либо предмет, в частности, дрейфтер, пассивно перемещается в водах Мирового океана в горизонтальном направлении, плывёт, то люди считают, что его переносят воды океана, он движется вместе с водой, переносимой течениями. Проблема и установлено, что течения в Мировом океане крайне малы и, поэтому, не создают в нём заметных перемещений предметов. Автором доклада установлено также, что эти перемещения предметов в Мировом океане создаются долгопериодными волнами, такими, как Волны Россби, Континентальные шельфовые волны, Инерционные и Приливные волны. Об этом доказательно изложено в докладе. К аналогичному выводу приходим, если измерения водной среды выполняются не дрейфтером, а стационарно установленным измерителем

If any object, in particular, a drifter, passively moves in the waters of the World Ocean in a horizontal direction, floats, then people believe that it is

carried by the waters of the ocean, it moves along with the water carried by the currents. The author of the report [2, 5, 6, 8, 9, 10, 11] and the authors of works [12, 13] studied this problem and found that the currents in the World Ocean are extremely small and, therefore, do not create noticeable movements of objects in it. The author of the report also found that these movements of objects in the World Ocean are created by long-term waves, such as Rossby waves, Continental shelf waves, Inertial and Tidal waves. This is evidenced in the report. We come to a similar conclusion if measurements of the aquatic environment are performed not by a drifter, but by a permanently installed meter.

Общие представления о течениях и Долгопериодных волнах Мирового Океана и об их измерениях

Современная наука о Мировом океане считает, что его динамика определяется в основном течениями и долгопериодными волнами. Популярна такая трактовка течений и волн: это движения частиц воды. В течениях, частицы объединены в некий объём воды и их движения в целом поступательны, однонаправлены, течениями поступательно переносится масса воды. В волнах частицы воды в режиме суперпозиции совершают возвратно-поступательные, колебательные, в основном циклонической и антициклонической направленности движения, относительно неподвижного центра равновесия, своего для каждой частицы. Волны массу воды поступательно, однонаправленно не переносят. Средой существования волн и течений в данном случае является вода. Всё, что оказывается в воде, но таковой не является, следует рассматривать, как инородные тела. Сюда следует отнести и дрейферы, и измерители течений, установленные стационарно.

В течениях, дрейфер, в режиме присоединённой массы воды, движется вместе с водой, поступательно. По движению дрейфера существует возможность определить пути движения некоторых объёмов воды, их скорость и направление. По показаниям измерителя течений, установленного стационарно, можно определить объёмы воды, перемещающейся в различных направлениях.

В волнах процесс взаимодействия волн и инородных тел происходит иначе, его можно описать так. Силовое поле волн действует на частицы воды силой пропорциональной плотности силовых линий. В свою очередь частицы воды действуют на инородные тела: дрейфер или прибор. В зависимости от места положения дрейфера или прибора в волне, дрейфер может совершать различные поступательные и возвратно-поступательные

движения, а прибор - фиксировать воздействия волн приблизительно схожей частотной структуры.

В настоящее время наука не даёт ответа, что представляют собой движения частиц воды в волнах, как соотносятся параметры волн с движением в них частиц воды, величиной движения дрейфера или показаниями приборов. Но важно понимать: волны не создают поступательных перемещений воды, а лишь небольшие возвратно-поступательные, в основном циклонической и антициклонической направленности, движения частиц воды вокруг некоего неподвижного центра равновесия.

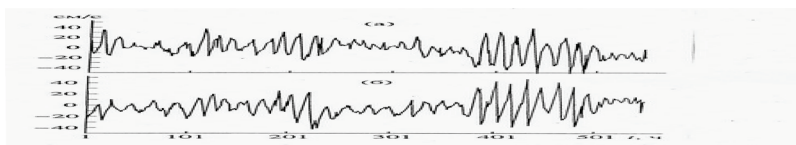


Рис. 2а, б. Проекция на меридиан (а) и параллель (б) колебаний скорости течений инерционных волн.

Вместе с тем дрейфер, помещённый в поле волн, совершает не только возвратно-поступательные движения, но и поступательные. Стационарно установленные приборы в измерениях будут выдавать сигнал эквивалентный движению дрейфера: возвратно-поступательный и поступательный. Масса воды в волне не переносится, а дрейфер совершает поступательные движения. Покажем, как это происходит. Далее приведём измерения долгопериодных волн Мирового океана дрейфером и стационарно установленными приборами. .

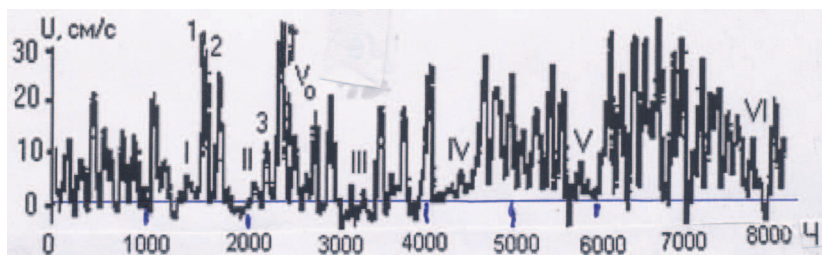


Рис. 1. Измерения скорости “течений” стационарно установленным прибором в пункте Нефтяные камни Каспийского моря.

Волны названы Континентальными шельфовыми волнами. В виде пульсаций выделяются колебания скорости “течений”, вызванные долгопериодными волнами, их период ~ 140 ч. Отдельные пульсации обозначены цифрами 1, 2 3. Направление “течений” на юг, и не меняется во времени. Период колебаний “течений” инерционных волн равен: $T=12\text{ч}/\sin\varphi$, где φ - широта места. Для пункта наблюдений период равен 17,5 ч. периоде. Из функций спектральной плоности

“течений” следует, что практически вся энергия “течений” принадлежит “течениям” инерционных волн.

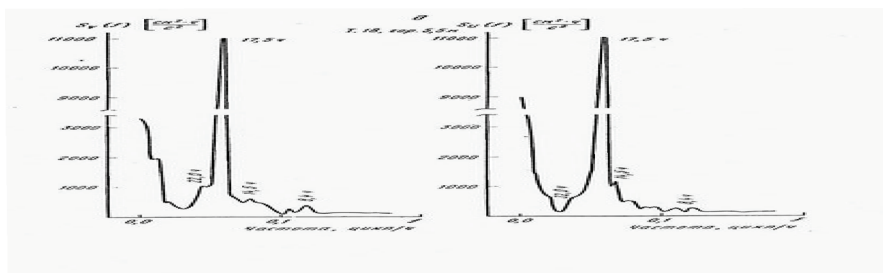


Рис. 2а, б. Функции спектральной плотности проекций “течений” на параллель (а) и меридиан (б). Из функций спектральной плотности “течений” следует, что практически вся энергия “течений” принадлежит “течениям” инерционных волн.

Под заключение приведём уникальные измерения “течений” на четырёх горизонтах в пункте около Бермудских островов [1].

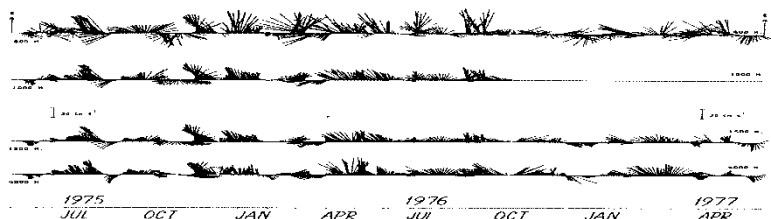


Рис 3. Среднесуточные векторы скорости течений, измеренных в 1975-76 гг. на горизонтах 500 м, 1000 м, 1500 м, 2000 м в Атлантическом океане недалеко от Бермудских островов [Атлас ПОЛИМОДЕЮ].

Трактуется, как измерения ‘течений’, но в этих измерениях на всех четырёх горизонтах зарегистрированы долгопериодные волны Россби с

периодом 40 суток. Фаза не меняется с глубиной, амплитуда с глубиной уменьшается незначительно. В функциях спектральной плотности “течений”, выделяются только волны, в спектре (а): 1 – приливные волны, 2 – инерционные волны, 3 - волны Россби, период 40 суток, в спектре (б): 4 – инерционные волны с периодом 17,5 ч, 5 – инерционные волны с периодом 17,5 ч, 6 – спектр групп инерционных волн, период 1000 ч.

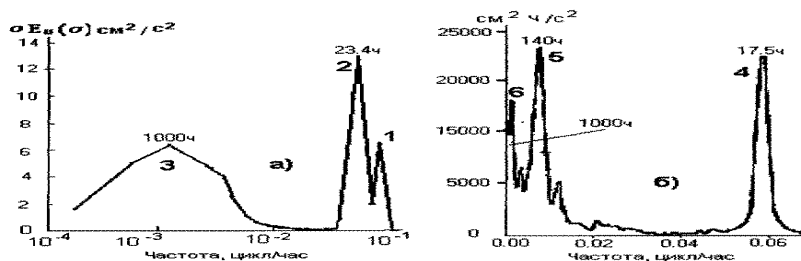


Рис. 4а, б. Функции спектральной плотности долгопериодных волн, типичные для океанов (а) и внутренних морей (б): а – построены по измерениям “течений” в западной Атлантике на глубине 500 м на станции “D”, по данным трехлетних измерений [Thompson, 1979];

б - Каспийского моря в пункте “Нефтяные Камни”, недалеко от Апшеронского п-ва, по данным трёхлетних измерений [Бондаренко, 2001].

Выводы

Установлено, что течения в Мировом океане крайне малы, и поэтому не просматриваются в движениях инородных тел, дрейфтеров и в показаниях стационарно установленных приборов. Эти движения и показания стационарно установленных приборов создаются не течениями, а Долгопериодными волнами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас ПОЛИМОДЕ. Под редакцией А.Д. Вуриса, В.М. Каменковича, А.С. Моница. Published by the Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole, Massachusetts, U.S.A. 1986. 370с.
2. Бондаренко А.Л. Течения Каспийского моря и формирование поля солёности вод Северного Каспия. М.: Наука. 1993. С. 122.
3. Бондаренко А.Л., Ведев Д.Л. Инерционные волны Каспийского моря// Водные ресурсы, 1998, т.25, №3, с.366-369.
4. Бондаренко А.Л., Ведев Д.Л. Инерционные волны Каспийского моря// Водные ресурсы, 1998, т.25, №3, с.366-369.

5. Бондаренко А.Л., Жмур В.В., Филиппов Ю.Г., Щевьев В.А. О переносе масс воды морскими и океанскими долгопериодными волнами // Морской гидрофизический журнал. Севастополь. 2004. № 5 (сентябрь - октябрь). С. 24-34.
6. Бондаренко А.Л., Филиппов Ю.Г. Течения в Каспийском море, обусловленные свободными низкочастотными волнами// Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С.73-77.
7. Бондаренко А.Л., Щевьев В.А. Изменение параметров инерционных волн в прибрежной зоне моря и на мелководьях// Метеорология и гидрология. 2006. №2. С.82-87.
8. Бондаренко А.Л., Борисов Е.В., Жмур В.В. О длинноволновой природе морских и океанских течений// Метеорология и гидрология. 2008. №1. С. 72 – 79.
9. Бондаренко А.Л., Серых И.В, Борисов Е.В., Суркова Г.В., Филиппов Ю.Г., Щевьев В.А. О влиянии волн Россби Мирового океана на термодинамику его вод и атмосферы, погоду и климат Земли// Метеорология и гидрология. 2011. № 4 С. 75 – 81.
10. Бондаренко А.Л. Лето 2010 года: жара в России и наводнения в Пакистане// Наука в России. март-апрель, № 2. 2013а. С.28-31.
http://www.oceanographers.ru/images/stories/pdf/bondarenko_rossby.doc
http://meteoweb.ru/articles/bondarenko_05_2013.pdf
11. Бондаренко А. Л. Крупномасштабная динамика и долгопериодные волны Мирового океана и атмосферы. 2020 г. Монография. МЕТЕОWEB.ru Интернет журнал, 189с <http://meteoweb.ru/aa0.php>
12. Лаппо С.С. Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М.: Наука. 1979. 183 с.
13. Корт В.Г. Мезомасштабная изменчивость течений и температуры в Южном океане по данным дрейфующих буёв// Океанология. 1981. т. XXI. Вып. 3. С. 405 – 415.

**ВНУТРИГОДОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ МОРЯ И
СИНОПТИЧЕСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА СУБАРКТИЧЕСКОЙ ЧАСТИ
ЯПОНСКОГО МОРЯ**

Трусенкова О.О.

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
Ул. Балтийская, 43, 690041, г. Владивосток, 8(423)2311400,
trolia@poi.dvo.ru*

**INTRA-ANNUAL SEA LEVEL FLUCTUATIONS AND
VARIABILITY OF MESOSCALE PROCESSES
IN THE SUBARCTIC PART OF THE JAPAN SEA**

Trusenkova O.O.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS,
43 Baltiyskaya Str., Vladivostok, 690041*

На основе ЭОФ-анализа данных спутниковой альтиметрии за 1993–2020 гг. исследованы внутригодовые колебания уровня Японского моря и энергетика динамических структур синоптического масштаба субарктической части моря. Установлено ежегодное присутствие синфазных на всей акватории колебаний уровня в диапазоне 70–250 сут., но без какого-либо выделенного масштаба, которые дают добавку к годовому ходу, особенно значимую в субарктической части моря. Выявлены статистические закономерности изменчивости долгоживущих динамических структур синоптического масштаба в субарктической части моря: они наиболее интенсивны в зоне Приморского течения, интенсифицируются летом и осенью и ослабляются зимой и весной, как и на всей акватории моря. Обсуждается межгодовая изменчивость этих процессов.

Intra-annual sea level fluctuations and variability of mesoscale processes in the subarctic Japan Sea were studied by EOF-analysis of satellite altimetry data for 1993–2020. The sea level fluctuations, simultaneous in

the entire sea, were found, being the strongest in the subarctic area and occurring in the range from 70 to 250 days without any preferable timescale. Statistical variability features were revealed for intensity of long-lived mesoscale dynamics structures in the subarctic area, which are the most intense within the Primorye Current zone; they strengthen in summer and fall and weaken in winter and spring, as it takes place in the entire sea. Interannual variability of the processes considered is discussed.

Уровень океана и морей является важным климатическим параметром и индикатором динамических процессов, что объясняет значительный интерес к исследованиям его изменчивости. По данным спутниковой альтиметрии были выполнены многочисленные работы по изменчивости уровня Японского моря на масштабах от синоптического до климатических, однако основное внимание уделялось субтропической части моря, где дисперсия уровня и энергия течений значительно выше. Напротив, целью данной работы является исследование внутригодовых колебаний уровня моря и интенсивности динамических структур синоптического масштаба в субарктической части Японского моря по данным спутниковой альтиметрии.

Альтиметрические аномалии уровня Японского моря за 1993-2020 гг. были подвергнуты высокочастотной фильтрации, с отсечением периодов больше 250 сут, после чего было выполнено разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Энергетика процессов синоптического масштаба была оценена с помощью вихревой кинетической энергии (ВКЭ), рассчитанной по альтиметрическим аномалиям геострофической скорости течения приповерхностного слоя. Для устранения шума ВКЭ была сглажена путем низкочастотной фильтрации, с отсечением периодов меньше 15 недель, после чего было выполнено разложение на ЭОФ. Для фильтрации данных и оценки масштабов изменчивости было использовано вейвлет-преобразование с материнским вейвлетом DOG.

Старшая мода внутригодовых аномалий уровня Японского моря описывает синфазные на всей акватории колебания, связанные с дисбалансом расходов воды в проливах и вносящие наибольший вклад (относительно локального фона) в субарктической части моря (рис. 1а). Временная функция показывает ежегодное присутствие синфазных на всей акватории колебаний уровня в диапазоне 70-250 сут (рис. 1в), но какого-либо преобладающего масштаба изменчивости не наблюдается, как показывают периоды внутригодовых колебаний, на которых мощность вейвлет-спектра временной функции максимальна (рис. 1г).

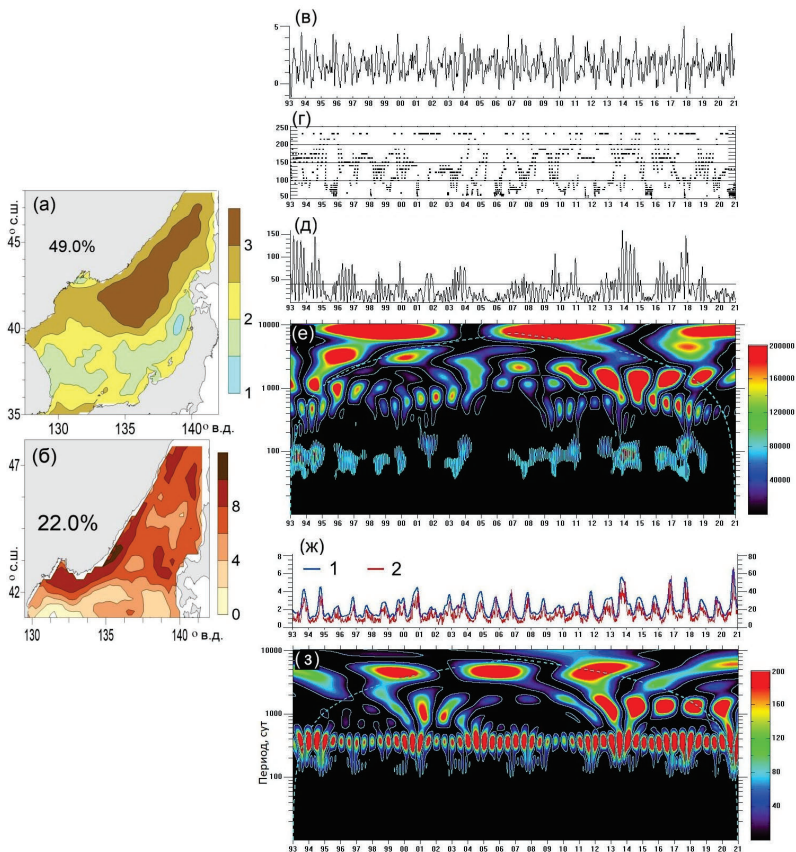


Рис. 1. Пространственные (а, б) и временные (в, ж) функции старших мод уровня моря (а, в) и вихревой кинетической энергии (б, ж, кривая 1); мгновенные периоды (сут) внутригодовых колебаний уровня моря (г); средняя мощность (в диапазоне 70-250 сут) вейвлет-спектра временной функции моды уровня (д) и ее вейвлет-спектр (е); вейвлет-спектр временной функции моды ВКЭ (з); показана вихревая кинетическая энергия, осредненная в северной части Японского моря (ж, кривая 2).

Рассчитана средняя интегральная мощность вейвлет-спектра временной функции в диапазоне 70-250 сут (P70-250), которая демонстрирует значительную межгодовую изменчивость этих колебаний (рис. 1д). В частности, в 2004-2008 гг. внутригодовые колебания уровня

Японского моря ослаблялись, как видно из вейвлет-спектра P70-250 (рис. 1е). В межгодовом плане расход воды в Корейском проливе возрастал с 1993 г. по 1999 г., резко уменьшился в 2000 г., стагнировал в 2001-2008 гг., а в 2009-2012 гг. тенденция к росту возобновилась (рис. 2 в работе [1]). Возможно, в периоды роста расхода его внутригодовые изменения усиливались, а подстройка расходов воды, покидающей моря через проливы Сангарский и Лаперуза, запаздывала, что и вызывало интенсификацию синфазных по акватории колебаний уровня моря.

Старшая мода ВКЭ дает наибольший вклад в зоне Приморского течения (рис. 1б), где на спутниковых инфракрасных изображениях многократно наблюдались склоновые вихри между струей течения и берегом. Как показывает временная функция, энергия этих процессов возрастает летом и осенью и уменьшается зимой и весной, с сезонными экстремумами в октябре-ноябре и марте-апреле (рис. 1ж), как это было ранее показано для всей акватории моря [2]. Вейвлет-спектр временной функции показывает регулярный годовой ход, а также значительную межгодовую изменчивость его интенсивности (рис. 1з). В межгодовом плане ВКЭ мало изменяется зимой и весной, но существенно – летом и осенью: она была низка в 1995, 1997-1998, 2001 и 2008-2010 гг., а с 2011 г. появилась тенденция к усилению, причем 2013, 2017, 2018 и 2020 гг. были экстремально интенсивны.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 121021700346-7; результаты опубликованы в статье [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Han M.H., Cho Y.-K., Kang H.-W., Nam S.H. Decadal Changes in Meridional Overturning Circulation in the East Sea (Sea of Japan) // *J. Phys. Oceanogr.* - 2022. - V. 50. - N. 1. - P. 1773–1791.
2. Трусенкова О.О. Оценка изменчивости вихревой кинетической энергии в Японском море по данным спутниковой альтиметрии // *Океанология.* - 2014. - № 1. - С. 12-21.
3. Trusenkov O.O., Kaplunenko D.D. Intra-Annual Sea Level Fluctuations and Variability of Mesoscale Processes in the Northern Japan/East Sea From Satellite Altimetry Data // *Front. Mar. Sci.* - 2022. – V.18. - Article 866328. DOI:10.3389/fmars.2022.866328.

О ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОВРЕМЕННОГО КЛИМАТА

Бышев В.И.¹, Гусев А.В.^{1,2}, Сидорова А.Н.¹

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект, д.36, 8(499)129-19-81
E-mail: labbyshev@ocean.ru*

²*Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН,
119333, Москва, ул. Губкина, д.8, 8(495) 984-81-20
E-mail: anatoly.v.gusev@gmail.ru*

ON THE PHYSICAL MODEL OF MODERN CLIMATE

Byshev V.I.¹, Gusev A.V.^{1,2}, Sidorova A.N.¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36 Nakhimovsky Prosp., Moscow 117997, Russia*

²*Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences,
8, ul. Gubkina, Moscow 119333, Russia*

Изученность особенностей современного климата позволяет получить представление о его физической модели. Центральным звеном такой модели является мультидекадная осцилляция теплосодержания Мирового океана, локализованная в слое главного термоклина, в котором сосредоточены основные системы течений: Гольфстрим, Курошио, Антарктическое Циркумполярное и др.

The study of the features of the modern climate allows us to get an idea of its physical model. The central element of such a model is the multi-decadal oscillation of the heat content of the World Ocean, localized in the layer of the main thermocline, in which the main systems of currents are concentrated: the Gulf Stream, the Kuroshio, the Antarctic Circumpolar, etc.

Изучение наблюдаемых особенностей текущего (последние 100-150 лет) климата [1-6] позволило выявить определенную его фазовую ритмичность. Удалось также выявить [7-8], что источником подобной

динамики климата являлся доминирующий в этот период времени режим крупномасштабного теплообмена между Мировым океаном и материками. Квазисинхронность и глобальность климатических изменений обусловлена наличием планетарных структур: и в атмосфере - Глобальной Атмосферной Осцилляции (рис 1), и в океане — Мультидекадной Осцилляции Теплосодержания Океана (рис. 2). Ритмичность в изменчивости современного климата примечательна тем, что каждый отдельный его ритм, например, ритм 1940-1999 гг., состоит из двух качественно различных фаз: относительно континентальной начальной (1940-1974 гг.) и существенно влажной завершающей (1975-1999 гг.). Фазы относительно континентального и влажного глобального климата ассоциируются, соответственно, с увеличением и сокращением теплосодержания слоя главного термоклина. Переход из континентальной фазы во влажную происходит довольно стремительно (за 2-3 года), представляя собой климатический сдвиг, что естественно, требует прогноза этого события.

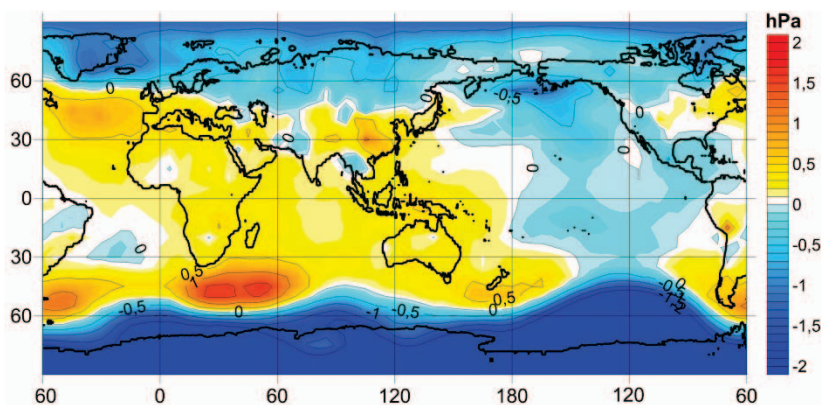


Рис. 1 Изменения глобального поля атмосферного давления на уровне моря между климатическими фазами 1980-1999 гг. и 1940-1970 гг.

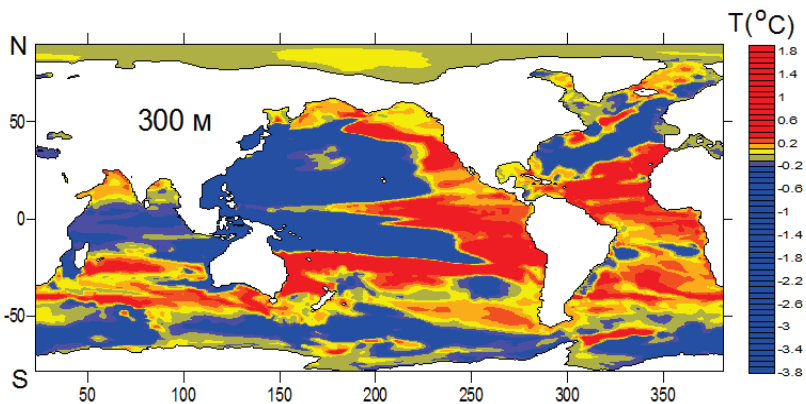


Рис. 2 Изменения поля температуры (°C) Мирового океана в слое главного термоклина (горизонт 300 м.) между климатическими фазами 1948-1974 и 1975- 1999 гг.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, тема № FMWE-2021-0003.

ЛИТЕРАТУРА

1. Byshev V.I., Gusev A.V., Neiman V.G., Sidorova A.N. Interdecadal Oscillation of the Ocean Heat Content as a Contribution to Understanding of Physical Aspects of the Present-Day Climate // *J. Mar. Sci. Eng.* 2022. 10(8). 1064; <https://doi.org/10.3390/jmse10081064>.
2. Бышев В.И., Анисимов М.В., Гусев А.В., Грузинов В.М., Сидорова А.Н. О мультидекадной осцилляции теплосодержания Мирового океана // *Океанологические исследования.* 2020. Т. 48. № 3, С. 76-95. doi: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(3).5.
3. Романов Ю.А., Нейман В.Г., Бышев В.И., Серых И.В., Сонечкин Д.М., Гусев А.В., Кононова Н.К., Пономарев В.И., Сидорова А.Н., Фигуркин А. Л., Анисимов М.В. Общая оценка статистической значимости и климатической роли глобальных атмосферных и океанических осцилляций // *Океанологические исследования.* 2019. Т. 47. № 2. С. 76–99. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).6.
4. Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M. Multi-decadal oscillations of the

ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. Vol. 174. No. 7. P. 2863–2878. DOI: 10.1007/s00024-017-1557-3.

5. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В., Сонечкин Д.М. О статистической значимости и климатической роли Глобальной атмосферной осцилляции // Океанология. 2016. Т. 56. № 2. С. 179–185.

6. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // ДАН. 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.

7. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О разнонаправленности изменений глобального климата на материках и океанах // ДАН. 2005. Т. 400. № 1. С. 98–104.

8. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А. О существенных различиях крупномасштабных изменений приземной температуры над океанами и материками // Океанология. 2006. Т. 46. № 2. С. 165–177.

УДК 634.67

ВОЛНОВАЯ ПРИРОДА ТЕЧЕНИЙ В ОКЕАНАХ И МОРЯХ

Щевьев В. А.

*Институт водных проблем РАН,
ул. Губкина, 3, 119333, г. Москва, 8(499)135-73-80,
shtshev@rambler.ru*

WAVE NATURE OF CURRENTS IN THE OCEANES AND SEA

Shtchev V. A.

*Institute of Water Problems of the RAS,
St.. Gubkina, 3, 119333, Moscow, 8(499)135-73-80,
shtshev@rambler.ru*

С. С. Лаппо (1979) провозгласил «Наступил волновой этап в исследованиях течений океанов». Многочисленные результаты измерений, подтверждают эту мысль.

S. S. Lappo (1979) showed "A wave stage has begun in the study of ocean currents." Numerous measurement results confirm this idea.

Лаппо Сергей Сергеевич (директор ИО РАН в 1993 - 2006 г.г.) на основе анализа 20 летних наблюдений (ПОЛИМОДЕ, и т.д.) сделал вывод: «Анализ наблюдений за течениями обнаружил существенную изменчивость динамического состояния вод, что весьма резко расходилось с существовавшими теоретическими концепциями. Эти наблюдения привели к **коренному пересмотру** представлений о динамике океана. Наступил **волновой этап** в исследованиях течений океанов» [1]. Этот вывод автор иллюстрирует рис. 1, где представлены спектры скорости течений на трех горизонтах и ветра.

Спектр изменчивости скоростей течений содержит узкий пик приливного характера, рядом с ним появляется также узкий и более мощный пик инерционных колебаний. Далее видим глубокий минимум пульсаций почти до нуля на периодах 2 – 4 суток. Это- зона раздела мезомасштабных и синоптических колебаний течений. На интервале периодов от 15 до 100 суток расположен синоптический максимум изменчивости течений, его энергия, превышает энергию приливных и инерционных колебаний.

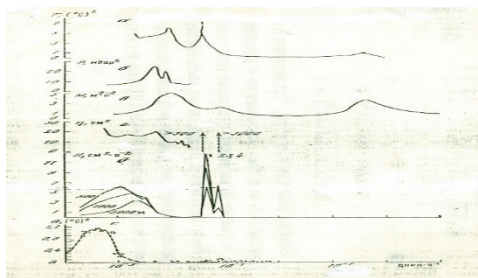


Рис. 1. Спектры изменчивости характеристик атмосферы и океана. (С. С. Лаппо, 1979). а – температуры воздуха в приземном слое (Колесникова, Монин, 1965); б – атмосферного давления (Hamon, 1962); в – скорости ветра в нижнем слое атмосферы (Van der Hoven, 1957); г – приведенного уровня океана (Hamon, 1962); д – скоростей течений на горизонтах 500, 1000 и 2000 м в западной точке Атлантического океана, точка Д (Rhines, 1971); е – температуры воды на горизонте 500-600 м у Бермудских островов (Wunsch, 1972).

Существенный вклад в копилку знаний о длиннопериодных волнах в океане сделал Корт В. Г. [2]. На акватории Южного океана было запущено 300 дрейфующих буев с датчиками температуры воды (программа ПГЭП США), декабрь 1978 г. по декабрь 1979 (36 тыс. наблюдений в месяц) (рис. 2).

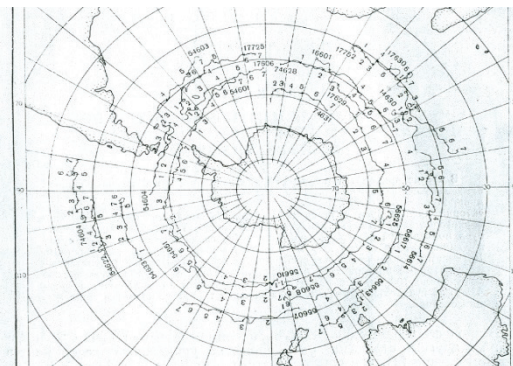


Рис. 2. Сводная карта дрейфа буев в зоне Антарктического Циркумполярного течения (АЦПТ). Тонкие линии показывают траектории дрейфа буев; цифры 1 – 7 над траекториями обозначают месяцы года, а многозначные цифры – номер буя.

Полный оборот в зоне Антарктического циркумполярного течения совершался буями за 37 - 40 месяцев (средняя скорость дрейфа 25-30 см/с при общей длине дрейфа 27 700 км.). Почти каждая траектория буя на всем протяжении имеет **волновой** характер. Период изменчивости 5 - 20 суток и длина волны от 200 до 400 км. (близки к бароклинным волнам Россби).

Halpern D., Knox R.A. and Luther D.S. (1988) [3] представляют наблюдения в экваториальной зоне Тихого океана (05. 1979-10 1985). Осцилляции **меридиональных** течений со средним периодом 20 суток наблюдались в верхних горизонтах океана в пунктах 95° , 110° , 124° , 140° , 152° W (рис. 3). Оценка **фазовой скорости** в западном направлении была равна 81 - 93 см/с. Длина волны вдоль экватора равна 1320 и 1600 км.

На рис. 3 приведены осредненные (Тоср. = 1 сутки) меридиональные компоненты течений на глубине 25 м. на экваторе в пунктах 108° и 110° W (верхний), и 134° и 140° W (нижний).

Оценка фазовой скорости в западном направлении была равна 81 - 93 см/с. Длина волны вдоль экватора равна 1320 и 1600 км. Восток - запад (и положительное значение восток), север-юг (v; положительное значение северное).

Philander et al. (1985) наблюдали 9 мес. в пункте $0; 110$ W Тихого океана и на поверхности обнаружили флюктуации 20 суток, и 30 суток на глубине более 2000 м. На горизонтах ниже 2000 м. наблюдались колебания 30 дневного периода. Период равный 20 суткам соответствует частоте 0,05 циклов в сутки (срп).

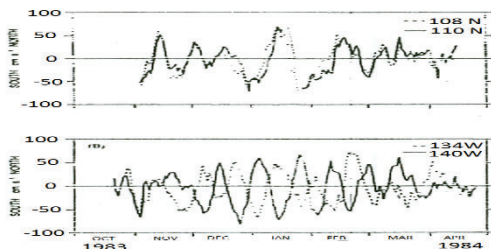


Рис. 3. Посуточно осредненные меридиональные компоненты течений (Тоср. 1 сутки) на глубине 25 м. на экваторе в пунктах 108° и 110° W (верхний), и 134° и 140° W (нижний) (правый).

На рис. 4 показано, что скорость перемещения на запад синоптических возмущений температуры в среднем составляла 4,5 см/с, что, более чем в 3 раза превышало наблюдаемое на горизонте 250 м. максимальное значение скорости, в западном направлении геострофического течения. Бернштейн и Уайт [4] сделали вывод, что, как и на «Полигоне - 70» (Koshlyakov, Grachev, 1973), перемещение на запад наблюдаемых во время TWE возмущений температуры носило преимущественно **волновой** характер (преобладающая длина волны была равна, примерно 400 км.).

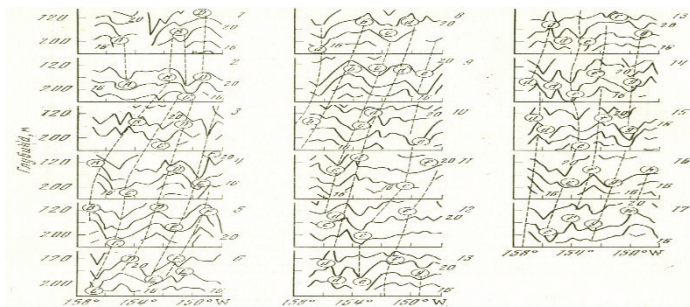


Рис. 4. Последовательные распределения температуры (С) в верхней части термоклина на повторенном 16 раз разрезе TWE в районе 25° с. ш. (02. 64-05. 65 г.) (Bernstein, White, 1974). Латинские буквы идентифицируют отдельные максимумы и минимумы температуры; положения этих экстремумов соединены штриховыми линиями.

В процессе исследований природы течений в океанах, морях и озерах [5] собрано большое количество работ, результаты которых подтверждают волновой характер течений в этих объектах. Здесь приведены результаты четырех работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаппо С. С. Среднемасштабные динамические процессы океана, возбуждаемые атмосферой. М., Наука, 1979. 182 с.
2. Корт В. Г. Водообмен Южного океана. – Океанологические исследования, 1963, №8, с. 5-16.
- 3 Halpern D., Knox R.A. and Luther D.S. Observation of 20-Day Period Meridional Current. Oscillations in the Upper Ocean along the Pacific Equator// J. Phys. Oceanography. V. 18. 1988. pp. 1514 -1534.
4. Bernstein R. L., Whit W. B. Time and length scales of eddies in the Central North Pacific ocean. –“J. Phys. Oceanogr.”, 1974, 4, N4, 613-624.
5. В. А. Щевьев. Физика волн в океанах, морях и озерах. Историческая драма идей, поисков, размышлений, заблуждений, открытий. М.: Бит-принт, 2019. 296 с.

УДК 53 (551.46)

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ДЛИННОПЕРИОДНЫХ ВОЛНАХ (Пространственно-временная изменчивость)

Щевьев В. А.

Институт Водных проблем РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3.
Тел. 499-135-73-80, e-mail Shtshevev@rambler.ru

PHYSICAL PROCESSES IN LONG-PERIOD WAVES (Spatio-temporal variability)

Shtshevev V. A.

Institute of Water Problems of the RAS,
St.. Gubkina, 3, 119333, Moscow, 8(499)135-73-80,
shtshevev@rambler.ru

К. Россби теоретически открыл низкочастотные волновые движения в океане (волны Россби). Начиная с 1960-х годов их стали фиксировать, измеряя изменчивость уровня, а затем и скорость течений. По результатам измерений можно выявить пространственно-временные закономерности этих волн.

K. Rossby discovered low-frequency wave motions in the ocean (Rossby waves) theoretically. Beginning in the 1960s, they began to be recorded by measuring the level variability, and then the speed of the currents. According to the measurement results, it is possible to reveal the spatio-temporal regularities of these waves.

Низкочастотные волновые движения в океане (волны Россби), открытые К. Россби теоретически, начиная с 60 годов XX века регистрировали по измерениям изменчивости уровня, а затем и скорости течений. В многочисленных работах авторы давали различные названия **наблюдаемым** движениям: «Медленные осцилляции; нестабильные волны; бароклинные береговые струи; топографические волны; континентальные шельфовые волны; синоптические вихри в океане; топографические ринги; захваченные экватором гравитационные волны Россби; волны Россби; экваториальные длинные волны; двойные волны Кельвина; внутренние волны; длиннопериодные волны».

Покажем некоторые результаты измерений и выводы о пространственно-временной изменчивости наблюдаемых процессов в этих волнах.

На рис. 1 представлены результаты измерений течений в точках 16, 17, 18, 19 (б-ж), температуры воды в точках 16, 17, 19 на горизонте 5,5 м. (б,г,е) у восточного берега Среднего Каспия. [1].

Период изменчивости равен приблизительно 150 ч. Сравнение векторных диаграмм течений в точках 16, 17 показало, что движение воды одинаковой фазы в точке 17 наступает на 60 часов позже, чем в точке 16. Эта величина определяется по разности времени между моментами регистрации подошвы или гребня волны в точках 16, 17. Тогда **фазовая скорость** будет равна 0,35 м/с., т. е. расстояние между точками 16, 17 (75 км.), деленное на сдвиг фазы (60 ч.). Соответственно, длина волны, определяемая как произведение фазовой скорости (0,35 см/с) на период волны (150 ч.), около 200 км.

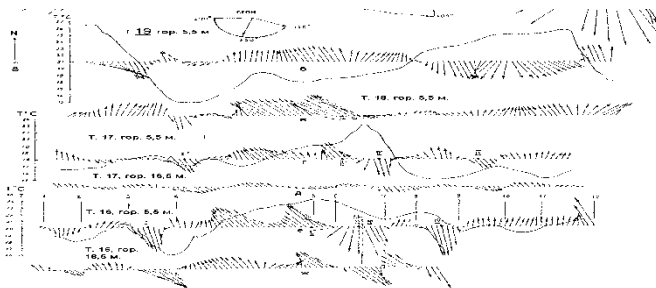


Рис. 1 Результаты измерений течений в точках 16, 17, 18, 19 (б-ж), температуры воды в точках 16, 17, 19 на горизонте 5,5 м. (б,г,е) у восточного берега Среднего Каспия. (1).

Период изменчивости равен приблизительно 150 ч. Сравнение векторных диаграмм течений в точках 16, 17 показало, что движение воды одинаковой фазы в точке 17 наступает на 60 часов позже, чем в точке 16. Эта величина определяется по разности времени между моментами регистрации подошвы или гребня волны в точках 16, 17. Тогда **фазовая скорость** будет равна 0,35 м/с., т. е. расстояние между точками 16, 17 (75 км.), деленное на сдвиг фазы (60 ч.). Соответственно, длина волны, определяемая как произведение фазовой скорости (0,35 см/с) на период волны (150 ч.), около 200 км.

На рис. 2 представлены результаты срочных наблюдений (1982-1984) в пункте «Нефтяные камни» в Среднем Каспии [3].

Спектральный анализ результатов наблюдений показал существование пика на частоте инерционного периода 17,5 ч. и на периоде 140 ч. (рис. 2 левый). Большой промежуток между пиками позволяет отфильтровать колебания разного периода и изучать их отдельно. На рис. 2 а, (правый) реализация, отфильтрованная фильтром 48 ч. Остались колебания Т пер. 140 ч. – течение волновой природы. Скорость этого течения от нуля увеличивается до максимального значения, затем уменьшается до нуля, а иногда имеет отрицательную скорость, обратное направление. Тот - же ряд, отфильтрованный фильтром 140 ч. показывает изменчивость скорости квазипостоянной циркуляции Среднего Каспия рис. (2.б). Таким образом наглядно видно, что волны переносят водную массу и фактически представляют собой течение волновой природы, для которых характерна периодическая изменчивость и наличие фазовой скорости. Крупномасштабная циклоническая циркуляция Среднего Каспия – это осредненное значение скорости вдольберегового волнового течения.

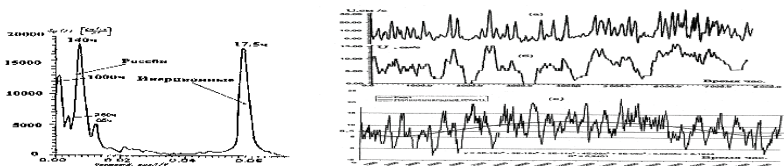


Рис 2. Функция спектральной плотности течений Среднего Каспия (слева), осредненный временной ряд вдольбереговой составляющей вектора скорости за год в пункте Нефтяные камни. $T_{оср.} = 48$ час.(а); тот же ряд осредненный фильтром скользящее равновесное среднее $T_{оср.} = 140$ час., представляет изменчивость скорости квазипостоянного течения Среднего Каспия (б); такой же временной ряд, но за 3 года. $T_{оср.} = 140$ час. (в). Жирной линией показана изменчивость средней скорости квазипостоянного течения (получено с помощью полинома).

На рис. 3. (верхний) изображен результат измерения суммарного течения (низкочастотные и высокочастотные) [2].

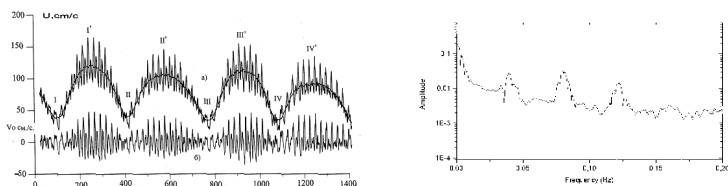


Рис. 3. Течения на банке Кашеварова (Рогачев К. А. 2001) (левый), функция спектральной плотности течений (правый) (Построил Трубкин И. П., ГОИН).

Четыре колебания низкочастотного волнового течения с периодом 13,66 суток и на его фоне высокочастотные колебания с периодом равным периоду инерционных колебаний (13,63 – 15,38 ч.). Амплитуда инерционных колебаний (нижний рис.) имеет большие значения при больших амплитудах волнового течения, и малые при малых значениях амплитуды длинноволнового течения. Можно сделать вывод. Движение длиннопериодного волнового течения (жирная линия) отклоняется в поле Кориолисовой силы. Образуются инерционные течения волновой природы (рис. 3 б).

На рис. 4 процесс воздействия ПО сил на водную массу в районе экватора [3,4]. 4 периода экваториального течения, направленного с

востока на запад. 4 области с большими скоростями западного направления (I, II, III, IV) и 4 области с минимальными скоростями (е, ж, з).

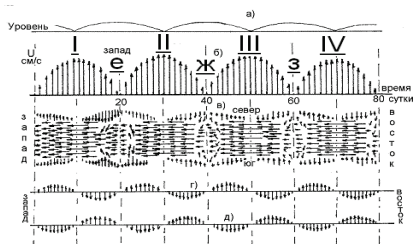


Рис. 4. Вектора скорости длиннопериодных волновых течений (ДПВТ) на экваторе. (б); Изменение уровня в области распространения ДПВТ а); вектора скорости в области распространения ДПВТ, вид сверху в); вектора скорости вдоль меридиана в северной и южной частях области распространения ДПВТ г) и д) соответственно.

ПО силы воздействуют ежедневно на водную массу этих областей, проходя последовательно справа налево. Объем воды с большой скоростью надвигается на объем с малой скоростью. Три процесса. а). Вода приобретает дополнительную скорость. б). Скорость увеличивается. Но это не твердое тело. Вода вытесняется вправо и влево. И г). Происходит движение фазы в западном направлении.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бондаренко А. Л., Ведев Д. Л., Комков И. А., Щевьев В. А. Экспериментальные исследования волновых течений в Среднем Каспии. Водные ресурсы, №1, 1993, с.129-131.
2. Рогачёв К. А. По льдине на банке Кашеварова. // Природа. 2001. №3. М. Наука РАН. С.33-38.
3. Щевьев В. А. Физика течений в океанах, морях и в озерах. История поисков, размышлений, заблуждений, открытий. 2012 г. Изд-во LAMBERT Academic Publishing. ISBN: 978-3-8484-1929- 6.
4. В. А. Щевьев. Физика волн в океанах, морях и озерах. Историческая драма идей, поисков, размышлений, заблуждений, открытий. М.: Бит-принт, 2019. 296 с.

**ВЛИЯНИЕ МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ НА
БИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧЕРНОГО МОРЯ ПО
РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ NEMO-BFM И
ДАНЫМ БУЕВ АРГО**

Кубряков А.А., Лишаев П.Н., Кубрякова Е.А., Мизюк А.И.

*Морской Гидрофизический Институт РАН, г. Севастополь, Россия
arskubr@ya.ru*

**INFLUENCE OF MESOSCAL DYNAMICS ON THE BIOLOGICAL
CHARACTERISTICS OF THE BLACK SEA ACCORDING TO THE
RESULTS OF NEMO-BFM NUMERICAL SIMULATION AND THE DATA
OF ARGO BUOYS**

Kubryakov A.A., Lishaev P.N., Kubryakova E.A., Mizyuk A.I.

**Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia
arskubr@ya.ru**

Предложены и описаны основные механизмы влияния вихрей и интенсивного ветрового воздействия на биологические характеристики Черного моря, их пространственные и сезонные особенности. Рассмотрены особенности влияния штормовых событий на возникновение, вертикальную эволюцию и развитие цветений фитопланктона.

The main mechanisms of the influence of eddies and intense wind impact on the biological characteristics of the Black Sea, their spatial and seasonal features are proposed and described. The features of the influence of storm events on the occurrence, vertical evolution and development of phytoplankton blooms are considered.

Ключевые слова: синоптические вихри, Био-Арго, физико-биохимическое моделирования, концентрация хлорофилла А, фитопланктон

Мезомасштабная динамика значительно влияют на протекание различных биохимических процессов в морской среде, поскольку модулируют адвективные и турбулентные потоки биогенных веществ, условия освещенности в верхнем слое. В настоящей работе результатов численного биохимического моделирования NEMO+BFM и массива данных буев Био-Арго, а также на основе методов автоматической

идентификации вихрей исследовано влияние синоптических вихрей и интенсивного ветрового воздействия на биологические характеристики Черного моря.

На основе данных численного моделирования NEMO+BFM и процедуры трехмерной идентификации в вихрях исследованы особенности распределения основных биогенных элементов (нитратов, аммония, фосфора) в вихрях, а также влияние вихрей на изменчивость биомассы различных групп фитопланктона. По данным измерений буев Арго исследованы особенности вертикального распределения концентрации хлорофилла А, показателя обратного рассеяния и характеристик освещенности (ФАР) в вихрях различного знака.

Идентификация и определение характеристик вихрей выполнена при поддержке гранта РФФ 21-77-10052, исследование влияния вихрей на характеристики фитопланктона выполнено при поддержке гранта РФФ 20-17-00167, численное моделирование выполнено при поддержке Госзадания FNNN-2021-0007

УДК 551.583

ПРИРОДА, ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Подымов И.С.¹, Подымова Т.М.^{1,2}

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,
8(499)124-13-01, ipodymov@inbox.ru, ²tpodymova@inbox.ru*

THE NATURE, CAUSES AND CONSEQUENCES TO ENVIRONMENTAL THE GLOBAL CLIMATE CHANGE

Podymov I.S.¹, Podymova T.M.^{1,2}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997, Russia*

В статье представлены некоторые результаты исследований, связанных с анализом глобальных геофизических процессов, происходящих в настоящее время на планете Земля, их влияния на изменение климата и воздействий на окружающую среду. Анализ

проводился на основе данных многолетних мониторинговых наблюдений и материалов открытых публикаций.

Paper presents some results of investigations related to the analysis of global geophysical processes currently taking place at the Earth planet, their impact to climate change and environmental impacts. The analysis has based on the date of long term monitoring observations and materials of open publications.

Авторы доклада представляют некоторые результаты исследований ИО РАН по теме «Морские природные системы Черного и Азовского морей: эволюция и современная динамика гидрофизических, гидрохимических, биологических, береговых и литодинамических процессов». В круг рассматриваемых ключевых геофизических процессов вошли: динамика геомагнитного поля и магнитных полюсов Земли, данные о землетрясениях на земном шаре и тектонической нестабильности планеты, ковариации радона в приземной атмосфере. Для анализа использованы данные многолетних мониторинговых наблюдений на полигонах Института океанологии, материалы Национального центра экологической информации США, Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC), зарубежных публикаций, а также данные со спутников NOAA, Swarm. Для мониторинговых наблюдений на полигонах Института океанологии используется аппаратно-программный комплекс спектрометрической регистрации высокочастотных вариаций объемной активности изотопа радона 222 (OAR) в приземной атмосфере и заякоренный зонд-профилограф, установленный над свалом (тектоническим разломом) в Черном море.

Перечисленная комбинация источников первичной информации позволяет получать в режиме on line следующие данные:

- доступ к базе данных всех произошедших и происходящих на земном шаре землетрясениям с 2005 года (предоставляет EMSC);
- комплексную информацию о всех параметрах атмосферы, океанов и внутренних морей земного шара (позволяет считывать NOAA);
- об аномалиях магнитного поля Земли (со спутников Swarm);
- о высокочастотных вариациях OAR в приземной атмосфере (регистрирует в автоматическом режиме аппаратно-программный спектрометрический комплекс);
- о гидрофизической информации (с зонда профилографа).

Спектрометрический радиометр фиксирует суммарную энергию дочерних короткоживущих продуктов бета-линий распада изотопов радона 222: висмута 214 и свинца 214. По уравнению эквивалентной равновесной

ОАР для неравновесной смеси короткоживущих дочерних продуктов распада рассчитывается ОАР. Частота считывания информации – 1 раз в час. Это, примерно, на два порядка выше возможной частоты считывания информации получаемой классическим методом. Подробная информация о реализованном в ИОРАН спектрометрическом методе дана в [1]. Не углубляясь в подробности можно сказать главное: этот метод позволяет получить частотную информацию о колебаниях земной коры на временных интервалах от суточного до многолетнего. Сравнение частот внутренних гравитационных волн (ВГВ) и вариаций ОАР в преддверии сейсмических аномалий показало на их высокое совпадение. Т.е., вариации ОАР и ВГВ в некоторых случаях могут служить предвестниками сейсмических событий.

Для чего понадобилось такое количество разной геофизической информации? Последние десятилетия количество глобальных аномалий на планете Земля существенно возросло. Причину этих событий трактуют по-разному. Но очень часто фигурируют такие фразы как «глобальное потепление», «концентрация углекислого газа», «человеческий фактор» и т.п. После событий 2011 года, когда за ночь большая площадь дна Азовского моря поднялась над поверхностью моря на 5 и более метров, было проведено много натурных исследований. Тогда и возникла идея установить на полигоне ИО РАН оборудование для непрерывного мониторинга сейсмической нестабильности земной поверхности и сопоставлять получаемые данные с происходящими на планете событиями. В январе 2016 года был установлен спектрометрический комплекс регистрации ОАР на полигоне ЮО ИОРАН. Мониторинг с того времени проводится непрерывно. На настоящий момент база данных вариаций ОАР включает более 60000 рядов измерений.

Последовательность произошедших глобальных процессов на планете Земля такова. В 1994 году спутники NOAA зафиксировали начало смещения магнитных полюсов Земли. Эта точка была принята как начало отсчета проявления геофизических аномалий. За 27 лет Северный магнитный полюс сместился на 1500 км в сторону п-ова Таймыр. В 1998 году спутники Swarm зафиксировали смещение твердого ядра Земли в северном направлении [2], что привело к резкому изменению геофизических параметров планеты. Появились аномалии магнитного поля континентального масштаба, связанные с особенностями потоков магмы в жидком ядре Земли, генерирующих внешнее магнитное поле. Возбуждение системы ядро-мантия, смещение ядра вызвало колебания (биения) самого ядра, а также привело к нарастающей генерации тепла в верхние слои мантии и отразилось на вращении земного шара. Тепло стало выделяться во всех слоях мантии, деформируемых дрейфующим и колеблющимся ядром. Разогретые флюиды и магма стали поступать в верхние уровни

мантии, к зонам спрединга, на дно океана и на поверхность Земли по направлению натиска ядра. Это вызвало нагрев поверхности земли, океана и привело к процессу «глобального потепления». Происходящие процессы привели к изменениям геодинамических и тектонических обстановок всех слоев мантии и литосферы, определяющих активность природных процессов планетарного масштаба: вулканизма, сейсмической активности, атмосферных процессов и процессов в океане, климатических изменений.

Сотрудник ИО РАН, Сорохтин О.Г., на основании своих исследований, считал, что все глобальные геофизические процессы связаны с прецессией земной оси. Земная ось наклонена к плоскости орбиты ее вращения вокруг Солнца примерно на 24° . Угол этот меняется вследствие прецессии – медленного движения оси вращения Земли по круговому конусу. Прецессия – результат неодинакового притяжения Земли Солнцем и Луной в разных ее частях. Вследствие полярного сжатия Земля имеет избыток массы в экваториальном поясе. Плоскость экватора не совпадает с плоскостью земной орбиты. Т.е. с плоскостью, в которой находится Солнце. Солнце притягивает близлежащую к нему часть экваториального утолщения Земли сильнее, чем противоположную, стремясь повернуть плоскость земного экватора в плоскость эклиптики. У Земли, как у вращающегося тела, возникает гироскопический эффект, препятствующий этому воздействию. В результате ось вращения Земли очень медленно описывает в пространстве, вокруг перпендикуляра к плоскости орбиты, конус с вершиной в центре Земли. Наклон земной оси к эклиптике при этом может меняться от 23° до 27° . Полный оборот, по разным оценкам, ось вращения делает за 24–26 тысяч лет. Помимо глобального движения земная ось совершает колебания, именуемые нутацией, с периодичностью 18–19 лет.

Некоторые аномалии на юге России. 1. Снижение уровня поверхности Черного и Азовского морей (11.2019 - 02.2020). 2. Образование трещины вдоль Маркхотского тектонического разлома в районе Новороссийска (09.2021). 3. Массовая гибель дельфинов (более 400 особей) в 2022 году вдоль побережий Краснодарского края и Крыма. 4. Массовая гибель тюленей в Каспийском море (более 2500 особей), 3 ноября 2022г. 4. Аппаратно зафиксированный поворот земной оси. Для всех зафиксированных событий есть иллюстративный материал и обоснования их проявлений.

Подробно о результатах комплексных исследований и о проявлении природных аномалий в южных регионах России предполагается рассказать на конференции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подымов, И.С. Некоторые результаты долговременного мониторинга объемной активности радона в приземной атмосфере северо-восточного сектора Черного моря / И.С. Подымов, Т.М. Подымова / в книге «Современные исследования в сфере естественных, технических и физико-математических наук». – Киров: МЦИТО, 2018. - С. 243-256.
2. Swarm reveals Earth's changing magnetism. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Swarm/Swarm_reveals_Earth_s_changing_magnetism (дата обращения 22.10.2022).

УДК 504.064.37

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ОПТИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Медведева А. В.¹, Станичный С. В.¹, Булатов В. В.²

¹ *ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул.
Капитанская, 2, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация
+7(978)015-3018, Suomi-npp@mail.ru*

² *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
пр. Вернадского, 101-1, 119526, г. Москва,
8(903)722-0761, internalwave@mail.ru*

FEATURES OF THE MANIFESTATION OF INTERNAL WAVES IN OPTICAL AND RADAR IMAGES

Medvedeva A. V.¹, Stanichny S. V.¹, Bulatov V. V.²

¹ *FSBSI FRC «Marine Hydrophysical Institute of RAS», 2 Kapitanskaya Str.,
Sevastopol, 299011, Russian Federation*

² *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS,
Prospekt Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia*

По спутниковым данным выделены проявления внутренних волн за счет гидродинамической и сликовой модуляции поверхности, из-за

модуляции глубины рассеивающего слоя, объектов природного и антропогенного происхождения и обрушений.

Situations with various mechanisms of manifestation of internal wave on satellite data due to hydrodynamic and slick modulation of the surface, due to modulation of the depth of the scattering layer, objects of natural and anthropogenic origin, and wavebreaking are considered.

Способность внутренних волн взаимодействовать с различными процессами и явлениями в Мировом океане обуславливает разнообразие их проявления. Ниже приведен обзор особенностей проявления внутренних волн на спутниковых оптических изображениях высокого пространственного разрешения (MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8) и на радиолокационных снимках (C-SAR Sentinel-1).

Радиолокационные изображения.

На радиолокационных изображениях поверхностное проявление внутренних волн детектируется за счет двух механизмов – гидродинамического и сликового [1]. Гидродинамическая модуляция поверхности при прохождении пакета внутренних волн определяется по изменению сигнала от зон конвергенции и дивергенции: обратное рассеяние увеличивается в зонах конвергенции, где шероховатость поверхности более выражена, и ослабляется к зонам дивергенции, где шероховатость поверхности менее выражена. Обычно случаи гидродинамического проявления внутренних волн обнаруживаются на фоне низких или умеренных скоростей ветра (примерно от 2-3 до 7-8 м/с).

Сликовый механизм также связан с формированием внутренними волнами системы конвергентно-дивергентных течений и модуляции пленок (сликов) природного или антропогенного происхождения. При прохождении пакета внутренних волн наблюдается противоположные гидродинамическому механизму эффекты: слики, концентрируясь в зонах конвергенции, выглаживают поверхность и способствуют ослаблению обратного рассеяния. Случаи проявления сликового механизма регистрируются обычно на фоне ветров со скоростями до 2-3 м/с.

Оптические изображения.

На оптических спутниковых изображениях механизмы проявления внутренних волн имеют более широкий диапазон из-за приема сенсором как отраженного, и рассеянного водной средой сигнала.

Гидродинамическая модуляция поверхности. Наиболее распространенные случаи поверхностного проявления внутренних волн, регистрация осуществляется за счет отраженного излучения и аналогична регистрации радиолокационными сенсорами. В зоне блика может

наблюдаться инверсия оптического контраста, – то есть, и из-за геометрических характеристик пакета для зон конвергенции и дивергенции значения яркости восходящего излучения, что в одной части фронта, могут быть противоположными в другой части, а в зоне перехода сравниваться.

Сликсовая модуляция поверхности. Проявление базируется на том же принципе, что и при фиксации радиолокационными сенсорами, пленками могут являться нефтепродукты, масла, пленки биологического происхождения и иные ПАВы. Взаимодействие внутренних волн и пленок регистрируется достаточно редко, на возможность обнаружения влияют характеристики приводного ветра (проявление при ветрах со скоростями примерно до 7-8 м/с) и взаимное расположение Солнца и спутника (проявление при различии в интенсивности сигналов отраженного излучения, поступающих от пленок и окружающих вод в оптический сенсор). Прохождение пакета внутренних волн создает два варианта взаимодействия с пленочными структурами. Первый вариант заключается в том, что пленки концентрируются в зонах конвергенции и отсутствуют в зонах дивергенции – характерно для оптически «тонких» пленок (изменяющих только шероховатость поверхности). Второй вариант связан с оптически «толстыми» пленками – теми, что помимо шероховатости поверхности изменяют и коэффициент отражения поверхности: при прохождении пакета внутренних волн пленки выявляются в зонах конвергенции и дивергенции, но под действием орбитальных течений варьирует их оптическая толщина.

Модуляция глубины рассеивающего слоя. Комбинирование оптических каналов позволяет минимизировать или устранить полностью отраженное излучение и выделить рассеянную компоненту сигнала. В рассеянном излучении обнаруживаются внутренние волны, изменяющие толщину мутного слоя: она меньше над гребнями пакета внутренних волн (достигающими или не достигающими поверхности) и больше – над подошвами. Внутренние волны с таким типом проявления обнаруживаются в районах с высоким содержанием гидрозолей (взвешенное вещество, фитопланктон) – преимущественно в зонах речных плюмов или в прибрежных зонах.

Модуляция объектов в поверхностном слое и на поверхности. Объекты, попадающие в морскую среду и находящиеся на поверхности (плавающие) или в поверхностном слое, имеют природное и антропогенное происхождение. Такими объектами могут быть: различный мусор, песок и частицы почвы, пыльца растений, икра рыб, слоевица Саргассовых водорослей, цианобактерии, морская слизь и др. Для этих природных формирований характерна концентрация в зонах конвергенции при прохождении пакета внутренних волн, и на оптических изображениях

выделяются квазипараллельные полосы с повышенной яркостью восходящего излучения с максимумом излучения на различных участках видимого диапазона (что зависит от оптических свойств объектов).

Модуляция льдов. Льды также относятся к плавающим объектам, и их изменение при прохождении внутренних волн имеет сходство с изменениями иных плавающих объектов. Но проявление пакета внутренних волн на оптических и радиолокационных изображениях зависит от характеристик льда. Так, немногочисленные разрозненные льдины концентрируются в зонах конвергенции в зависимости от размера: большому влиянию орбитальных течений подвержены льдины малых размеров (до десятков метров), меньшему – более крупные (от сотен метров). В тех случаях, когда регистрируются начальные виды льда или тающий однолетний лед, проявление внутренних волн зависит от толщины льда: они могут представлять собой чередование зон преимущественно льда (зоны конвергенции) и преимущественно водной поверхности (зоны дивергенции) при прохождении через поле льда с малой толщиной, и могут выделяться за счет чередования льдов большей и меньшей толщины. Во втором случае в зонах конвергенции отражение сигнала происходит ото льда, а в зонах дивергенции – от смеси льда и воды. Кроме того, регистрируются случаи, когда прохождении пакета внутренних волн меняет характеристики льда – трансформирует его в менее плотный по ширине фронта.

Модуляция обрушений. Проявление внутренних волн осуществляется за счет формирования пены (барашков) на гребнях ветровых волн в зонах конвергенции пакета внутренних волн при ветрах умеренных или высоких скоростей (от 5-8 м/с и выше) [2]. Обычно такой механизм реализуется для интенсивных внутренних волн – примером таких могут служить внутренние волны, распространяемые из Гибралтарского пролива в Средиземное море. Они генерируются под действием полусуточных приливов из-за сложного рельефа дна на входе в Гибралтарский пролив и имеют высоту амплитуды в сотни метров.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №23-21-00194 «Аналитические методы математического моделирования волновой динамики неоднородных гидрофизических сред».

ЛИТЕРАТУРА

1. Robinson I. S. Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography. – Springer Science & Business Media, 2004.
2. Kubryakov A. A., Kudryavtsev V. N., Stanichny S. V. Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking //Remote Sensing of Environment. – 2021. – Т. 253. – С. 112-144.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОГО РАЗВИТИЯ КОККОЛИТОФОРИДОВ В МРАМОРНОМ МОРЕ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Медведева А. В., Станичный С. В.

*ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН», ул.
Капитанская, 2, 299011, г. Севастополь, Российская Федерация
+7(978)015-3018, Suomi-npp@mail.ru*

FEATURES OF THE INTENSIVE DEVELOPMENT OF COCCOLITHOPHORES IN THE MARMARA SEA ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

Medvedeva A. V., Stanichny S. V.

*FSBSI FRC «Marine Hydrophysical Institute of RAS», 2 Kapitanskaya Str.,
Sevastopol, 299011, Russian Federation*

По оптическим спутниковым данным проанализировано интенсивное развитие кокколитофорида в Мраморном море с 1978 по 2022 г.

The intensive development of coccolithophores in the Marmara Sea from 1978 to 2022 was analyzed using optical satellite data.

Мраморное море находится между Черным и Эгейским морем, с которыми осуществляется водообмен через проливы Босфор и Дарданеллы. В Черном и Мраморном морях регулярно в весенне-летний период наблюдается интенсивное развитие кокколитофорида, в отдельные годы – экстремальное. Далее рассмотрены случаи интенсивного развития кокколитофорида в Мраморном море и соседних акваториях по оптическим спутниковым данным.

В работе анализировались случаи интенсивного развития кокколитофорида в Мраморном и Черном морях (с 1978 по 2022 гг.) и распространение биологических трассеров (кокколитофорида, морской слизи) в Эгейском море за счет выноса из мраморноморской акватории (с 2000 по 2022 гг.) на основе использования оптических спутниковых данных среднего разрешения (MODIS Aqua, MODIS Terra, VIIRS Suomi-NPP,

VIIRS NOAA-20, GeoEye OrbView-2, CZCS Nimbus-7) и высокого (TM Landsat-5, OLI Landsat-8) пространственного разрешения. Дополнительно привлекались данные о скорости ветра (MERRA-2 Model: Surface wind speed, time average (M2T1NXFLX v5.12.4), осадках (MERRA-2 Model: Total surface precipitation (M2TMNXFLX v5.12.4), температуре поверхности моря (MODIS-Aqua: Sea Surface Temperature at 11 microns (Day) (MODISA_L3m_SST_Monthly_4km_vR2019.0)), значениях яркости восходящего излучения на канале 488 нм (MODIS-Aqua: Remote Sensing Reflectance at 488 nm (Rrs) (MODISA_L3m_RRS_8d_4km_v2018)), концентрации хлорофилла-а (MODIS-Aqua: Chlorophyll a concentration (MODISA_L3m_CHL v2018)).

С 1978 по 2022 г. экстремальное развитие кокколитофоровидов в Черном море, начавшееся в мае-июне, наблюдалось в 1993, 2002, 2006, 2008, 2012, 2017, 2019 и 2022 гг. Развитие этих случаев [2] обуславливается выносом биогенных элементов в поверхностные слои вод из нижележащих за счет интенсивной зимней конвекции и увеличения плотности поверхностных вод (ранее из-за низких зимних температур поверхностных вод, далее – под влиянием роста солености черноморских вод). А в мае-июне формируются благоприятные условия: высокое летнее облучение, низкое отношение азота к фосфору и доступный фосфат. В Черном море, несмотря на рост зимних температур, по-прежнему прослеживается, что интенсивное развитие кокколитофоровидов регистрируется после более холодных зим в сравнении с предшествующим годом.

Мраморное море существенно отличается от Черного. Хотя имеется сходство климатических условий, Мраморное море представляет собой проточный стратифицированный бассейн, в котором воды выше пикноклина преимущественно черноморского происхождения и подвержены сезонным изменениям, а ниже пикноклина – преимущественно из Эгейского моря и характеризуются устойчивой температурой (около 14.6 °C) и соленостью (около 38.6 ‰). При этом в ряде работ отмечается проблема эвтрофикации районов акватории, особенно заливов [3].

В Мраморном море с 2003 по 2022 гг. на основе значений яркости восходящего излучения на длине волны 488 нм (MODIS Aqua) экстремальное развитие кокколитофоровидов фиксировалось в 2003, 2009, 2010 и 2015 гг. (RRS не менее 0.015 sr^{-1}), оптическими сенсорами в видимом диапазоне – распространение кокколитофоровидов по всему или практически всему бассейну. Менее выраженные (RRS не менее 0.010 sr^{-1}) случаи выделялись в 2012, 2017 и 2019 гг. С 1978 до 2002 гг. степень интенсивности развития кокколитофоровидов определялась визуально по RGB-композитам (распространение по акватории, контраст с чистыми водами), поэтому имеет приблизительную оценку. К экстремальным

случаям были отнесены в 1990, 1991, 1993, 1995 и 1997 гг., к менее интенсивным – в 1980, 1982, 1989, 1992, 1998 гг. Отсутствие или практически полное отсутствие развития кокколитофорилов в Мраморном море наблюдалось в 1985, 2001 и 2007 гг. Все остальные случаи характеризуются или локальным распространением, или слабым проявлением (иногда точно не определяемым, как кокколитофориды).

В 2021 г. в Мраморном море регистрировалось экстремальное развитие морской слизи с марта по июль. И если в среднем пик развития кокколитофорилов в мраморноморских водах характерен для мая-июня (за исключением 2013 г., когда максимум наблюдался в конце апреля и первых числах мая), то в 2021 г. был в июле.

При сопоставлении в Мраморном море случаев интенсивного развития кокколитофорилов с параметрами гидрометеорологических условий (в пределах доступных данных) не выявляется какая-либо зависимость (температура, осадки, случаи интенсивного развития кокколитофорилов в Черном море), но при этом допускается, что определенная роль может принадлежать интенсивному ветровому перемешиванию в зимний сезон, когда устойчивость и перепад плотности в пикноклине, который на протяжении всего года залегает на глубинах от 20 до 30 м, минимальны. Также в последние годы в связи с общим ростом температуры вод первые признаки развития кокколитофорилов выявляются в апреле и начале мая.

Неоднозначен вопрос о происхождении кокколитофорилов. При анализе оптических данных обнаруживается, что в отдельные годы первоначально кокколитофориды интенсивно развиваются в локальных районах Мраморного моря – заливах Измитский, Гемликский, Бандырма, а также иногда в иных прибрежных зонах. Выраженное развитие в заливе Измитский фиксировалось с 2000 по 2022 г. в 2002, 2003, 2005, 2006, 2008, 2009, 2014, 2015, 2019 и 2022 г., первоначально – в 2003, 2006, 2009, 2019 и 2022 гг. Залив испытывает выраженную антропогенную нагрузку, в его водах выявляется высокое содержание биогенных элементов: концентрация оксидов азота может достигать около 9 μM , аммония – около 2.9 μM , фосфатов – около 1.2 μM и общего фосфора – около 1.4 μM (в слое от 0 до 30 м) [1].

Тем не менее, допускается, что источником биогенных элементов и собственно кокколитофорилов могут быть соседние акватории. В частности, Черное море (регистрируется перенос кокколитофорилов, не исключено влияние переноса дунайских и прибрежных вод вдоль восточного берега с концентрацией хлорофилла-а до 3-5 и более mg/m^3). При этом перенос кокколитофорилов через Босфорский пролив не всегда вызывает интенсивное развитие кокколитофорилов в Мраморном море.

В Эгейском море периодически наблюдается распространение мраморноморских вод, содержащих кокколитофориды, степень проявления которых зависит как от интенсивности развития кокколитофоридов в Мраморном море, так и от их распространения в нем (по всему морю или части). Наиболее интенсивное проявление выноса фиксировалось в июне и июле 2003 г., мае и июне 2009 г., мае 2010 г., мае и июне 2015 г., то есть, при экстремальном развитии кокколитофоридов в Мраморном море.

В 2021 г. также регистрировался вынос морской слизи с конца апреля до начала июля, в конце апреля и начала мая наблюдалось экстремальное насыщение северной части Эгейского моря (практически весь район севернее о. Лемнос).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 23-27-00421 и в рамках гос. задания FNNN-2021-0006 (пространственная и временная изменчивость интенсивного развития кокколитофоридов в Мраморном море).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Eyuboglu H., Eyüboğlu Ö. İzmit Körfezi'nde Kirlетici Kaynakların Dağılımı ve Deniz Ekosistemine Etkisi //Journal of Anatolian Environmental and Animal Sciences. – Т. 5. – №. 1. – С. 25-37.
2. Kubryakov A. A., Mikaelyan A. S., Stanichny S. V. Extremely strong coccolithophore blooms in the Black Sea: The decisive role of winter vertical entrainment of deep water //Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers. – 2021. – Т. 173. – С. 103554.
3. Yalçın B., Artüz M. L., Pavlidou A., Çubuk S. and Dassenakis M. Nutrient dynamics and eutrophication in the Sea of Marmara: Data from recent oceanographic research //Science of The Total Environment. – 2017. – Т. 601. – С. 405-424.

ДИАГНОСТИКА ПУЗЫРЬКОВЫХ ОБЛАКОВ В МОРЕ МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Буланов В.А.¹, Соседко Е.В.²

^{1,2} Тихоокеанский океанологический институт океанологии им.
В.И. Ильичева ДВО РАН,
Балтийская ул., 43, 690041, г. Владивосток, 8(423)237-49-13,¹
bulanov@poi.dvo.ru,² sosedko@poi.dvo.ru,

DIAGNOSTICS OF BUBBLE CLOUDS IN THE SEA BY NONLINEAR NONSTATIONARY SPECTROSCOPY

Bulanov V.A.¹., Sosedko E.V.²

^{1,2} V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of
Russian Academy of Sciences,
Baltiskaya St., 43, 690041, Vladivostok, 8(423)237-49-1 bulanov@poi.dvo.ru,²
sosedko@poi.dvo.ru

Обсуждено применение методов нелинейного нестационарного рассеяния звука в задачах дистанционной спектроскопии пузырьков в морской воде. Показано, что применение новых методов позволяет получать оперативную информацию о структуре и динамики пузырьков облаков и подводных газовых факелов в море.

The application of methods of nonlinear nonstationary sound scattering in the problems of remote spectroscopy of bubbles in seawater is discussed. It is shown that the using of these methods makes it possible to obtain operational information about the structure and dynamics of bubble clouds and underwater gas flares in the sea..

Пузырьковые облака в приповерхностных слоях моря являются неотъемлемым свойством моря при умеренном и сильном ветре. Роль пузырьков при газообмене между океаном и атмосферой резко возрастает при образовании пузырьков облаков [1-4]. Большое внимание к пузырьковой тематике также обращено в связи с изучением распределения и поведения подводных газовых факелов (ГФ), образованных газовыми

пузырьками, выходящими из дна моря [3,5]. Стандартные акустические методы с применением линейного рассеяния звука не позволяют в полной мере оценить функцию распределения пузырьков по размерам и поэтому возникают значительные неопределенности с оценкой структуры и динамики как пузырьков облаков в приповерхностных слоях моря, так в подводных ГФ. В работе обсуждено применение методов нелинейного и нестационарного рассеяния для решения подобных задач, который заключается в применении как бигармонического, так и фазоманипулированного возбуждения [5].

Рассматривая изменения радиуса пузырька малыми по сравнению с равновесным радиусом $R(t)=R_0(1+z^{(1)}+z^{(2)})$, $|z^{(1)}| \ll 1$, $|z^{(2)}| \ll 1$, где $z^{(1)}(t)$ и $z^{(2)}(t)$ описывают пульсации включения в первом и втором приближениях, можно из уравнения Рэлея-Плессета найти выражения для $z^{(1)}(t)$ и $z^{(2)}(t) \approx z_{\Omega}(t)$ [2]. Величину давления в волне разностной частоты, генерируемой при нелинейном рассеянии звука на пузырьке на расстоянии r , можно определить в квадратичном приближении с помощью величин из решения линейного приближения в виде $P_s^{(2)}(r,t) = (\rho R^3 / r) [\dot{z}^{(2)} + 2z^{(1)}\dot{z}^{(1)} + 2(\dot{z}^{(1)})^2]$. Тогда сечение нелинейного рассеяния на одиночном пузырьке $\sigma_{1\Omega}(R)$ следует непосредственно из формулы $\sigma_{1\Omega}^{(2)}(R) = r^2 \langle |P_s^{(2)}|^2 / |P_i|^2 \rangle$, где $\langle \dots \rangle$ - означает усреднение по времени. При рассеянии на совокупности пузырьков с функцией $g(R)$ коэффициент нелинейного рассеяния, $m_{V\Omega}^{(2)} = \int \sigma_{1\Omega}^{(2)}(R)g(R)dR$, имеет вид [5]

$$m_{V\Omega}^{(2)} = m_{V\Omega\omega}^{(2)} + m_{V\Omega\omega^2}^{(2)} F(\tau / \tau_{\Omega}), \quad (1)$$

где $\Omega = \omega_1 - \omega_2$, δ_{Ω} - постоянная затухания пузырька на частоте Ω , функция, определяющая переходные процессы, равна $F(x) = (x + e^{-x} - 1) / x$, $x = \tau / \tau_{\Omega} = \tau / (1 / \Omega \delta_{\Omega})$, $K \approx 1 / (\gamma P_0)$. Видно, что на длинных импульсах $m_{V\Omega}^{(2)} = m_{V\Omega\omega}^{(2)} + m_{V\Omega\omega^2}^{(2)}$, а на коротких импульсах $m_{V\Omega}^{(2)} \approx m_{V\Omega\omega}^{(2)}$. Результат существенно зависит от вида функции распределения $g(R)$. В итоге функция распределения $g(R)$ может быть определена в виде

$$g(R_{\Omega}) = \frac{4\delta_{\Omega}}{\pi^2} \frac{m_{V\Omega\omega^2}^{(2)} - m_{V\Omega\omega}^{(2)}}{R_{\Omega}^3 (\Omega / \omega)^4} \frac{9}{|KP_1|^2}. \quad (2)$$

Важным нестационарным механизмом рассеяния звука на пузырьках является механизм раскочки собственных колебаний пузырьков в переходных процессах высокочастотными (ВЧ) фазоманипулированными импульсами (ФМ) и затем эффективного их переизлучения [5].

Необходимым условием для поддержания низкочастотных (НЧ) колебаний ФМ внешней силой является: 1) - кратность соотношений между частотами ω_0 и ω ; 2) - длительность интервала T между последующими возбуждаемыми ФМ импульсами, определяющая НЧ колебания, не больше периода ВЧ, умноженного на величину добротности осциллятора [5]. В случае, если пузырек подвержен действию ФМ импульсов, тогда в случае большого разнесения частот, $\omega \gg \omega_0$, можно получить выражение для давления в рассеянной волне в виде $P_R(t) = P_{R\omega}(t) + P_{R\omega_0}(t)$.

$$P_{R\omega_0}(t)$$

Амплитуда рассеянного звука на собственной частоте пузырька устанавливается в течение времени $\tau_0 = 1/\delta\omega_0$ и достигает стационарной амплитуды, при условии $\omega_0 T = \pi$ равной $P_{R\omega_0 m} = P_m / [\delta\pi(m+1)]$. Следует подчеркнуть практическую выгоду импульсного возбуждения осциллятора ВЧ накачкой, когда достаточно просто изменяя соотношение между ВЧ и НЧ и интервалы времени между сменой фазы ФМ импульсов можно получать весьма высокие амплитуды колебаний. В итоге можно определить суммарный квадрат звукового давления $|P_{\Sigma\omega_0}(\mathbf{r}, t)|^2$, откуда можно определить $g(R)$ в виде

$$g(R) = \frac{2\delta\omega_0 T}{\theta^2 c \tau R R_\omega^2 F(\tau/\tau_0)} \frac{\langle |P_{\Sigma\omega_0}|^2 \rangle}{\langle |P_i|^2 \rangle} \equiv \frac{\pi\delta\omega_0 T}{R R_\omega^2 F(\tau/\tau_0)} m_{Vpm}, \quad (3)$$

где $R = R_\omega(2m+1)$, $m = 1, 2, \dots$. Из формулы (3) следует, что спектроскопия резонансных включений осуществляется дискретно по указанным радиусам, где управляющим параметром является отношение преобразования частот $(2m+1)$, $m = 1, 2, \dots$.

Метод нелинейного рассеяния звука на встречных пучках может быть использован для регистрации скопления пузырьков и измерения функции распределения пузырьков по размерам $g(R)$ в факелах вблизи дна моря. Следует применять акустическое излучение вертикально вниз с разнесением во времени зондирующих импульсов на задержку Δt , вариация которой позволит зондировать различные области газового факела.

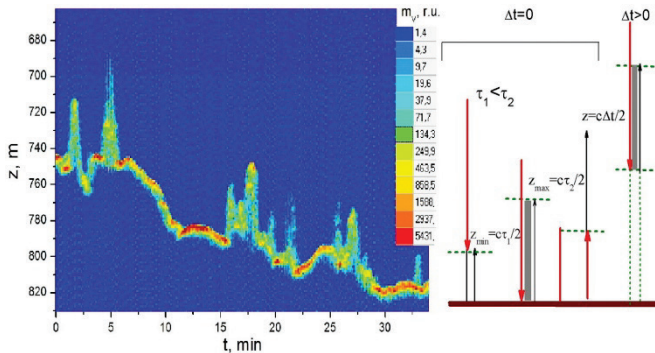


Рис.1. Схема рассеяния звука вблизи дна моря на встречных пучках

Дно моря используется для создания отраженного импульса длительности τ_1 с частотой ω_1 , который мог бы, как показано на рис.1, в заданном месте относительно этой поверхности взаимодействовать с прямым импульсом длительности τ_2 с частотой ω_2 , излучаемым через определенное время Δt . При $\Delta t = 0$ взаимодействие между прямым и отраженным импульсами осуществляется на расстояниях от дна моря с $z_{\min} = c\tau_1 / 2$ до $z_{\max} = c\tau_2 / 2$. При $\Delta t \neq 0$ величина z_{\min} изменяется и равна $z_{\min} = c(\Delta t + \tau_1) / 2$. Таким образом, можно исследовать нелинейное взаимодействие на различных глубинах.

Работа выполнялась в рамках госзадания №0271-2019-0009 при поддержке гранта Российского научного фонда №22-22-00499.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Baschek, D. M. Farmer. Gas Bubbles as Oceanographic Tracers. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology .2010. Vol.27. No 1, pp.241-245
2. V.A. Akulichev, V.A. Bulanov. Measurements of bubbles in sea water by nonstationary sound scattering // J. Acoust. Soc. Am. 2011. Vol.130, No5, pt.2, pp.3438-3449
3. R. Liu, Z. Li. The Effects of Bubble Scattering on Sound Propagation in Shallow Water. J. Mar. Sci. Eng. 2021, 9, 1441.
4. В.А. Буланов, М.Г. Валитов, И.В. Корсков, Р.Б. Шакиров. О глубоководных акустических неоднородностях в придонных слоях в Охотском и Японском море // Подводные исследования и робототехника. 2022. №. 3 (41). С. 67– 78.

5. В.А. Буланов, Е.В. Соседко. Особенности нестационарного и нелинейного рассеяния звука на пузырьках и возможности их спектроскопии // Акуст. ж., 2022, Т.68, № 4, с. 373–384.

УДК 535:621.373.826:539

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ И СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСКОЙ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Буланов А.В.

*Тихоокеанский океанологический институт океанологии им.
В.И. Ильичева ДВО РАН,
Балтийская ул., 43, 690041, г. Владивосток, a_bulanov@me.com*

STUDIES OF HYDROPHYSICAL AND SPECTRAL CHARACTERISTICS OF SEAWATER USING AN AUTOMATED COMPLEX

Bulanov A.V.

*V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of
Russian Academy of Sciences,
43, Baltiskaya St., Vladivostok, 690041, a_bulanov@me.com*

Представлены новые данные по исследованиям спектральных и других гидрофизических характеристик морской воды с применением разработанного автоматизированного комплекса в экспедициях НИС "Профессор Гагаринский" (рейс №81) в Японском море в августе 2022 г.

New data on studies of spectral and other hydrophysical characteristics of seawater using the developed automated complex in the expeditions of the RV "Professor Gagarinsky" (cruise No. 81) in the Sea of Japan in August 2022 are presented.

В связи с возрастающей антропогенной нагрузкой на экосистемы и вводом международных углеродных налогов актуальным оказывается изучение стоков, эмиссии и «захоронения» углекислого газа в различных

средах, которые получили название карбоновых полигонов. Методы оптической спектроскопии позволяют реализовывать непрерывные измерения в реальном времени, как *in-situ*, так и дистанционно. Для решения многих фундаментальных и прикладных задач требуются регулярные измерения, производимые в водной толще [1,2]. Известно применение метода искровой и лазерно-искровой спектроскопии (ЛИС) для элементного анализа жидкостей [1–3], который в отношении оперативности и экономичности потенциально перспективнее по сравнению с традиционными химическими методами, применяемыми в океанологических исследованиях [3,4]. Получение оперативных данных о других гидрофизических характеристиках морской воды - температуре, солености, мутности и концентрации растворенного кислорода играют важную роль для океанографических измерений [4].



Рис.1. Блок-схема автоматизированного комплекса для исследования гидрофизических и спектральных характеристик морской воды

Автоматизированный комплекс позволяет измерять эмиссионные спектры растворенных в воде элементов, мутность, соленость, температуру, концентрацию растворенного кислорода, а также, географические координаты, атмосферное давление, направление движения и характеристики качки судна (включая угловые характеристики – крен и тангаж). Блок-схема комплекса представлена на рис.1. Внутри комплекса установлен микрокомпьютер, позволяющий производить регистрацию и

предварительную обработку данных. Микрокомпьютер запускает насос, перекачивающий жидкость через проточную кювету, в которой при помощи датчиков происходит регистрация температуры, солености, мутности и растворенного кислорода.

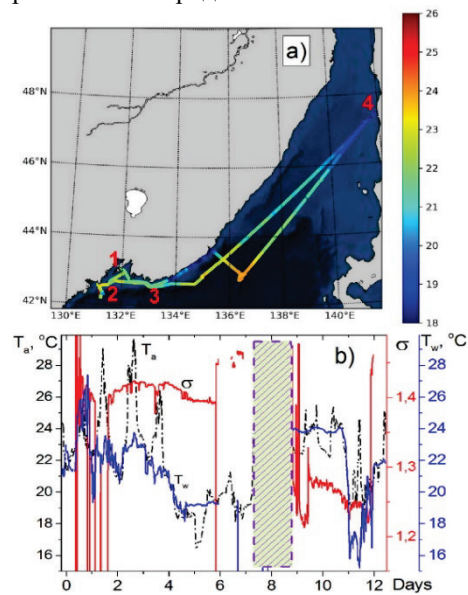


Рис. 2. Карта маршрута НИС "Профессор Гагаринский" (а) и распределение температуры воздуха и воды и электропроводности воды (b) в приповерхностном слое на глубине 4 м. Цветом на рис.2а показана температура воды, заштрихованная область на рис 2b соответствует стоянке судна на якоре в северной точке маршрута.

Из проточной кюветы исследуемая жидкость перекачивается во вспомогательную кювету, где при помощи ультразвукового излучателя преобразуется в мелкодисперсный аэрозоль и подается в измерительную кювету, в которой под действием искрового разряда в кювете возникают эмиссионные спектры, характеризующие химический состав исследуемой жидкости. Спектры анализируются при помощи монохроматора М1-44, ПЗС матрицы TCD1304 и платы управления ПЗС матрицей, построенной на базе STM32. Результаты регистрируются и записываются в устройство хранения данных микрокомпьютера. Для анализа полученных спектральных данных создана программа на языке программирования Python. Входными данными для программы являлись наборы файлов

изображения спектра пробоя данных типа *.csv, сформированные с помощью STM32 и переданные на микрокомпьютер через последовательный порт. Результатом являлся спектр пробоя с выделенными спектральными линиями химических элементов. Комплекс был использован в натуральных исследованиях в экспедиции в Японском море и Татарском проливе в рейсе №81 НИС «Профессор Гагаринский» с 1 по 14 августа 2022 г. На рис. 2 показано распределение температуры воздуха и воды и электропроводности воды с высоким пространственным разрешением в зависимости от времени и координат, которые одновременно регистрировались комплексом. На рис.3 представлены линии углерода, полученные в различных координатных точках в верхнем слое Японского моря

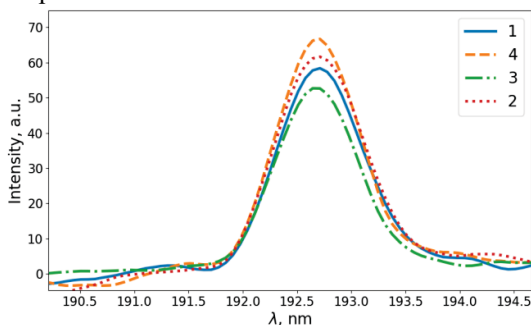


Рис. 3. Интенсивности линий углерода, полученных в различных координатных точках (рис.2а) в верхнем слое Японского моря.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-22-20075).

ЛИТЕРАТУРА

1. D.A. Cremers, L.J. Radziemski Handbook of laser-induced Breakdown Spectroscopy. Second ed., John Wiley & sons, Chicester, 2013, 432 p.
2. R. Noll Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Fundamentals and Applications. Springer, Berlin, 2012, 543 p.
3. Ягов В.В., Коротков А.С., Жирков А.А., и др.. Портативный атомно-эмиссионный спектрометр для анализа растворов на основе капельно-искрового разряда // Журн. Аналитич. химии, 2019, Т. 74, №3 с.234-240
4. Bulanov A.V. Using of Ultrasound in Automated Laser Induced Breakdown Spectroscopy Complex for Operational Study of Spectral Characteristics of Seawater of Carbon Polygons // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. Vol. 86, Suppl. 1, pp. S32–S36.

**ПОЛУЧЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМЕЗОМАСШТАБНЫХ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ВЫЗВАННЫХ ПОТОКОМ
РЕЧНОГО ПЛЮМА ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ С
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Новиков Б.А., Кубряков А.А.

*Морской гидрофизический институт РАН,
Ул. Капитанская, 2, 299011, г. Севастополь,
8(978)559-38-21, alsha996@yandex.ru*

**OBTAINING CHARACTERISTICS OF SUBMESOSCALE
DYNAMIC PROCESSES CAUSED BY A RIVER PLUME FLOW
FROM OPTICAL SURVEY DATA FROM UNMANNED
AERIAL VEHICLES**

Novikov B.A., Kubryakov A.A.,

*Marine Hydrophysical Institute RAS, str. Kapitanskaya, 2, 299011,
Sevastopol*

По данным оптической видео съемки с БПЛА получены скорости интенсивного потока речного плюма, периоды, частоты и длины волнения ветровых волн и подповерхностных волн плюма. Методом Фурье анализа двумерных спектров волны плюма отделены от общего поля волнения.

From the data of optical video shooting from the UAV, the velocities of an intense river plume flow, periods, frequencies and wavelengths of wind waves and subsurface plume waves were obtained. Using the Fourier method of analysis of two-dimensional spectra, the plume waves are separated from the general wave field.

Съемка морской поверхности с малых высот с применением бортовой оптической камеры, установленной на беспилотном летательном аппарате малых размеров, является перспективной задачей оперативной океанографии и мониторинга морской среды и побережья. Данные получаемые таким образом дают представление о высокочастотных характеристиках динамических мезомасштабных и субмезомасштабных

процессах. В данной работе авторы приводят пример анализа такого важного процесса, как вынос взвешенного вещества речным потоком, приводящим как к накоплению и развитию пляжа, так и к эрозии и отступлению берега. В качестве полигона исследований был выбран район устья реки Бельбек, Севастополь (рис. 1). Съемка проводилась в июле 2021 года после обильных дождей.

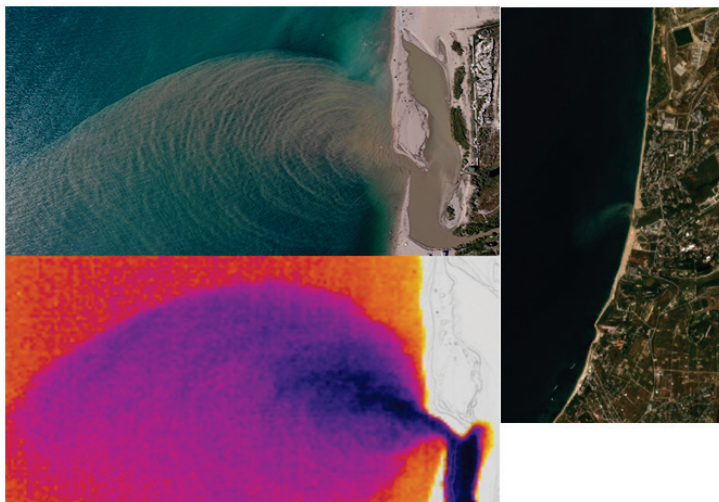


Рис. 1. Фотография плюма реки Бельбек в районе впадения в Чёрное море. Слева – фотографии, сделанные с БПЛА: Сверху - фотография в оптическом диапазоне, снизу - в ближнем инфракрасном диапазоне (синим – холодная речная вода, оранжевым – тёплая морская). Справа – фрагмент снимка Sentinel-2 (L2A) района исследования за день до проведения исследования.

Для съемки использовался БПЛА типа DJI enterprise 2 dual с бортовой оптической и инфракрасной камерой. Съемка велась при нулевой облачности, под углом в 90 градусов к горизонту с высоты 500 метров непрерывно в течении 3 минут. В алгоритме анализа использовался красный диапазон оптической камеры.

Полученные данные видеосъемки, представленные как набор последовательных кадров частотой 29 кадров/сек и разрешением 3840×2160 пикселей, обрабатывались фильтром скользящего среднего по пространству и по времени, с целью минимизации “шумов”, вызванных солнечными бликами.

В районе в момент проведения съемки можно выделить три основные вида динамических волновых процессов, оказывающих влияние на морскую среду: ветровые волны, вызванные северным ветром; внутренние волны; и подповерхностные волны пульсирующего потока речного плюма. По построенному графику изменения коэффициента яркости на видео в нескольких точках можно определить наличие процессов разного происхождения в разных частях района исследования (рис. 2).

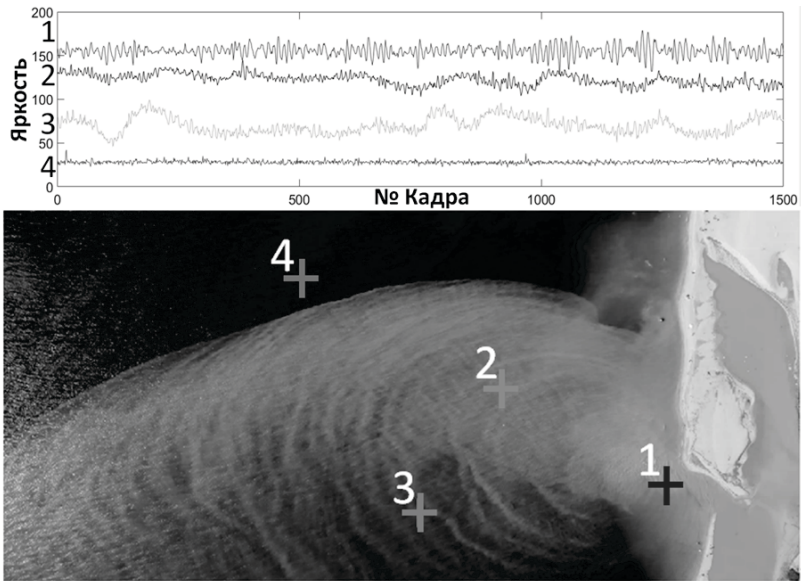


Рис. 2. Сверху – график яркости пикселей в указанных точках в красном канале видеоматериала. Снизу – места постановки точек для выборки. Цифрами показано соответствие точек на фото с графиками.

Высокочастотные колебания (чётко видны в точке 4), которыми характеризуется ветровое волнение, отфильтровывались от колебаний волн плюма (чётко видны в точке 2,3), по ходу анализа на этапе применения дискретного преобразования фурье и анализа двумерных спектров по формуле:

$$Y_{p+1,q+1} = \sum_{m=1}^{m-1} \sum_{j=0}^{j=n-1} \sum_{k=0}^{k=0} \omega_{jpm} \omega_{kqn} X_{j+1,k+1}.$$

где X – коэффициент яркости пикселей в красном канале от 0 до 255

В результате отделения ветровых волн от волн плюма алгоритм взаимной корреляции применялся для двух процессов отдельно. Далее, после перехода в метрическую систему координат, полученное значение скорости потока составило 2.88 м/сек +/- 0.2м в районе русла реки, и 1.8 м/сек +/- 0.2 м. на расстоянии 200 метров от устья.

Для волн разных периодов и происхождения рассчитаны длины в метрах и направления (углы) движения в декартовой системе координат (рис. 3).

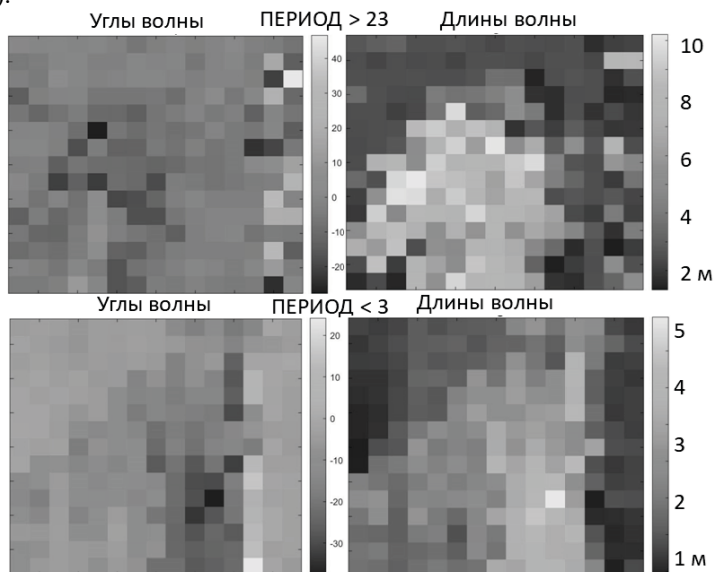


Рис. 3. Рассчитанные поля углов и длин волн в квадратах 5 на 5 метров. Сверху – для периодов больше 23 секунд, снизу для периодов меньше 3 секунд.

Результаты анализа показывают приемлемую точность и могут быть использованы в дальнейших работах по определению динамических характеристик полей волнения, а также для построения моделей и анализа воздействия волн на берега. Метод может быть использован для долговременного мониторинга и анализа динамики развития прибрежной среды.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 21-77-10052. Разработка методов восстановления волн и течений выполнено при поддержке гос. задания FNNN-2021-0006.

**ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ
НЕФРОНТАЛЬНЫХ ВИХРЕЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ**

Елкин Д.Н.¹, Зацепин А.Г.^{1,2}, Шварцман Д.Р.²

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр., 36, 117997, г.*

Москва, 8(499)124-63-92, dmelkin@mail.ru

²*Московский физико-технический институт*

**LABORATORY INVESTIGATIONS OF THE EVOLUTION OF
NONFRONTAL EDDIES IN A TWO-LAYER ROTATING FLUID**

Zatsepin A.G.^{1,2}, Elkin D.N.¹, Shvartsman D.R.²

¹*P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences*

dmelkin@mail.ru

²*Moscow Institute of Physics and Technology*

Выявлены закономерности эволюции бароклинных вихрей, во вращающейся двухслойной жидкости путем лабораторного моделирования. С помощью «метода цилиндра» создавались циклонические и антициклонические вихри в верхнем слое, и прослеживалась их эволюция на протяжении 100 и более периодов вращения платформы.

Some regularities of the evolution of baroclinic vortices in a rotating two-layer fluid are studied by means of laboratory modelling. Using the “cylinder method”, cyclonic and anticyclonic eddies were produced in the upper layer, and their evolution was traced over 100 or more periods of platform rotation.

Одной из важных структурных форм организации движения вод океана являются мезомасштабные бароклинные вихри [1]. Образование этих вихрей происходит под действием различных механизмов, включающих в себя влияние топографических и орографических неоднородностей на океанские течения, пространственно-неоднородное воздействие ветра, а также бароклинную неустойчивость

стратифицированных по плотности течений, характеризующихся наличием вертикального градиента скорости.

Целью текущей работы является установление путем лабораторного моделирования закономерностей процесса неустойчивости и вязкого вырождения бароклинных вихрей открытого океана (т.е., без ядра инородных вод) в условиях гладкого и шероховатого дна. В качестве механизма создания вихрей использовался метод «внутреннего цилиндра». С помощью этого метода создавались циклонические и антициклонические вихри в двухслойно стратифицированной по солености водной среде в цилиндрическом бассейне, расположенном на вращающейся платформе.

Опыты проводились следующим образом. В раскрученную до твердотельного вращения двуслойно-стратифицированную по солености водную среду с помощью специально разработанного устройства автоматическим образом вертикально погружался полый цилиндр на глубину, превышающую толщину верхнего слоя. Верхний слой воды в цилиндре подкрашивался. Для создания циклона часть подкрашенной воды верхнего слоя откачивалась, а для создания антициклона дополнительное количество подкрашенной воды той же плотности добавлялось в верхний слой внутрь цилиндра. После того, как созданное этой процедурой возмущение водной среды затухало, цилиндр автоматическим образом быстро вынимался из воды и, вместе с устройством его перемещения, снимался с вращающейся платформы. Непосредственно перед поднятием цилиндра включались две видеокамеры, расположенные как над платформой, так и сбоку вблизи стенки бассейна. Они осуществляли запись процесса эволюции вихря в бассейне, визуализированной красителями. Для определения горизонтального распределения скорости течения, обусловленной вихрями, на поверхность воды помещались бумажные пелетки. Опыты продолжались до тех пор, пока вихри не вырождались либо из-за вязкого трения на дне и на боковой стенке бассейна, либо вследствие неустойчивости и распада первоначального вихря на вторичные вихревые структуры. При этом одни и те же опыты проводились над гладким и шероховатым дном.

Данные видеосъемки эволюции вихрей обрабатывались с помощью специальных компьютерных программ. Рассчитывалась орбитальная скорость вихря в верхнем слое, ее распределение в зависимости от расстояния от центра вихря. Идентифицировались особенности его эволюции (инерционные колебания в процессе геострофического приспособления, бароклинная неустойчивость и распад вихря на вторичные вихревые структуры, или его постепенное вязкое вырождение). Определялись безразмерные параметры: числа Россби, Бюргера и Фруда.

Основные результаты работы заключаются в следующем.

Установлено, что в начале каждого опыта происходит процесс геострофического приспособления вихря, сопровождающийся радиальными колебаниями на удвоенной частоте вращения платформы. Эти колебания затухают на протяжении $5-10T$, где T – период вращения платформы (лабораторные сутки). Установлено, что частота этих колебаний близка к значению параметра Кориолиса, однако для циклонов она несколько больше, чем для антициклонов. Таким образом, данные колебания являются инерционными.

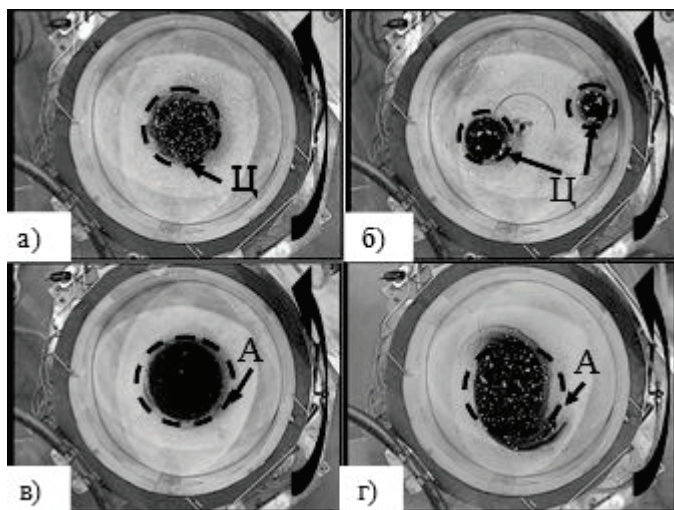


Рис. 1. Кадры, демонстрирующие неустойчивость первоначально осесимметричных вихрей при $Bu_0 = 0.28$: а) циклон на стадии формирования; б) распад циклона на два вторичных циклонических вихря через $25T$; в) антициклон на стадии формирования; г) слабая неустойчивость антициклон через $25T$. $T = 10$ с - период вращения платформы. Толстая стрелка – направление вращения платформы. Пунктиром обозначены вихри: буквой Ц – циклонические, буквой А – антициклонические.

Для осесимметричных (устойчивых) циклонических вихрей на практике подтверждено экспоненциальное затухание скорости вихря со временем. В опытах с некоторыми антициклоническими вихрями обнаружен эффект периодического ускорения скорости вращения вихря в процессе его затухания, который нуждается в теоретическом обосновании.

Влияние шероховатости дна на процесс затухания вихревых структур было слабо выраженным даже тогда, когда шероховатость существенно превышала масштаб Экмана. Из этого следует, что затухание вихря происходило в основном благодаря горизонтальному, а не вертикальному трению.

Установлено, что неустойчивость вихрей и их распад на вторичные вихревые структуры происходит при значениях начального числа Бюргера (Bu_0) существенно меньших единицы, как было показано ранее в опытах с фронтальными вихрями, содержащими воду другой плотности по сравнению с окружающей их водой [2, 3].

Циклоны являются менее устойчивыми по сравнению с антициклонами (Рис.1). Это связано с их большей агеострофичностью, т.е., большим влиянием центробежной силы на динамику вихря. С учетом этого, найден критерий устойчивости, единый для циклонов и антициклонов, определяющийся отношением числа Бюргера к числу Фруда. Шероховатость дна увеличивает устойчивость, как циклонических, так и антициклонических вихрей. Такой же, стабилизирующий вихри эффект, обнаружен и в случае наклонного дна.

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № FMWE-2021-0002, при финансовой поддержке гранта РФФ № 21-77-10052.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане - Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. - 264 с.
2. Saunders P.M. The Instability of a Baroclinic Vortex // J. Phys. Oceanogr. 3(1): 61–65
3. Зацепин А.Г., Костяной А.Г. Лабораторные исследования неустойчивости бароклинных вихрей и фронтов. – В сб.: Когерентные структуры и самоорганизация океанских движений. М.: Наука. 1992. С.163-176.

**ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ АЛЕУТСКИХ ВИХРЕЙ
В ЭПОХУ АЛЬТИМЕТРИИ**

Пранц С.В., Будянский М.В., Улейский М.Ю.

*Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
690041, Владивосток, Балтийская 43,
8(4232)31-26-02, prants@poi.dvo.ru*

**LAGRANGE ANALYSIS OF THE ALEUTAN EDDIES DURING
THE AGE OF ALTIMETRY**

Prants S.V., Budyansky M.V., Uleysky M.Yu.

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute
Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences,
Russia, Primorsky Krai, 690041, Vladivostok, Baltiyskaya 43,
8(4232)31-26-02, prants@poi.dvo.ru*

С помощью алгоритма автоматического обнаружения вихрей и лагранжевой диагностики проведен учет всех мезомасштабных алеутских антициклонов в 1993–2021 г. История каждого такого вихря документирована, включая его зарождение, взаимодействие с подводными горами, расщепление и распад. Оценены кинематические характеристики вихрей. Алеутские антициклоны обеспечивают пограничные течения западной субарктики мезотермальными водами субтропического происхождения.

Systematic census of all mesoscale Aleutian anticyclones in 1993–2021 was carried out using the algorithm for automatic detection of eddies and Lagrangian diagnostics. The history of each eddy was documented, including the birth, interaction with seamounts, splitting and decay. Kinematic characteristics of the eddies are estimated. The Aleutian anticyclones provide the boundary currents of the Western Subarctic with a mesothermal water of subtropical origin.

Алеутские антициклоны (АА) возникают над Алеутским желобом в районе 50–52° с.ш., 170–175° в.д. (рис. 1). Некоторые из их дрейфуют вдоль этого желоба на северо-запад. Однако большинство АА дрейфует зонально

к побережью Камчатки благодаря бета-эффекту. Вычисляя в поле АВИЗО на каждые сутки эллиптические точки в центрах вихрей, мы фиксируем время рождения каждого вихря и отслеживаем его траекторию. В качестве АА рассматривались только те антициклоны, которые возникли в указанной области, а их центры со временем пересекли 170-й меридиан будучи более 100 км в поперечнике (рис. 1). С помощью алгоритма АМЕДА и лагранжевой диагностики [1] были обнаружены 26 долгоживущих АА в период 1993–2019 гг.

Приближаясь к возвышенности Детройт (рис. 2), все АА деформируются. Некоторые из них расщепляются надвое. После прохождения возвышенности АА постепенно уменьшаются в размерах и, как правило, расщепляются и затем распадаются прежде, чем достигнут Курило-Камчатского желоба. Чтобы определить происхождение водных масс в ядрах АА, а также зафиксировать захват и высвобождение воды с их периферии, вычислялись лагранжевы карты происхождения вод (О-карты). На рис. 2 в качестве примера показаны эпизоды из жизни АА, измеренного 13 июня 2012 г. в рейсе авторами [2] и названного ими вихрем С. Инспектируя О-карты, мы проследили историю вихря С со дня его образования в области АЕ на рис. 1b. После отделения от течения центр С пересек 170-й меридиан 5 ноября 2012 г. и в конце февраля приблизился к возвышенности Детройт, постепенно деформируясь в эллиптический вихрь (см. рис. 2a) и вращаясь по часовой стрелке. Он расщепился над возвышенностью надвое в середине мая (рис. 2b). Оба продукта расщепления C_1 и C_2 прошли возвышенность к середине августа 2013 г., дрейфуя на запад (см. рис. 2c и d). Последний остаток вихря С пересек 161-й меридиан в конце мая 2015 г. Вихрь существовал в течение 4 лет и перенес воду Аляскинского течения к Камчатке на расстояние порядка 1000 км.

Сезонная модификация термохалинной структуры АА изучалась на основе профилей буев Арго. В теплое время года верхний перемешанный слой простирается до 10–20 м. Ниже этого слоя на глубине 50–200 м залегает холодная дихотермальная вода. Мезотермальная вода наблюдается под ней в слое 200–600 м. В холодное время года перемешанный слой опускается до 100–120 м с соленостью 32,8–33,2 psu. Сезонный термоклин и галоклин простираются до 150–180 м. Теплая (3,7–4,2° С) мезотермальная вода с соленостью 33,5–34,0 psu находится в слое 200–600 м.

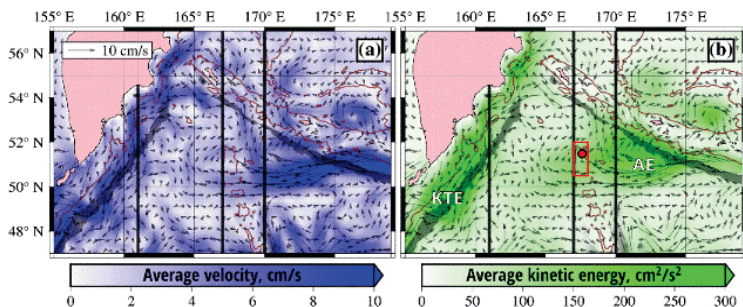


Рис. 1. а) Геострофическое поле скорости АВИЗО в районе схождения Курило-Камчатского и Алеутского желобов и б) средняя кинетическая энергия, усредненные с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2019 г.

Прямоугольник и точка внутри него схематически показывают местоположение возвышенности Детройт и одноименного гайота. Контрольные 170, 167 и 161-й меридианы показаны прямыми линиями. КТЕ и АЕ – районы формирования и стагнации Камчатских и Алеутских вихрей. Показаны изобаты желобов ниже 6 км (серые полосы) и изобаты возвышенностей дна выше 3 км.

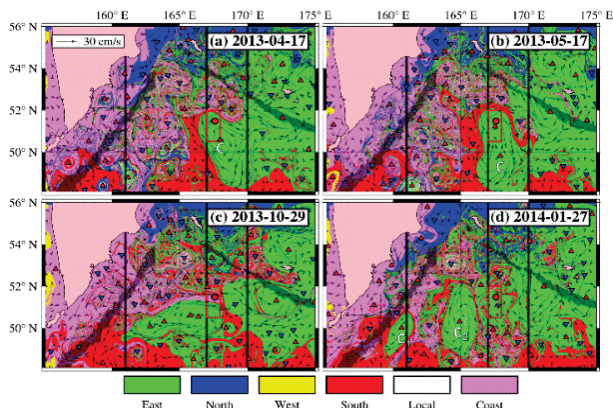


Рис. 2. Лагранжевы карты происхождения вод иллюстрируют процесс взаимодействия Алеутского вихря *C* с подводной возвышенностью Детройт (красный прямоугольник) в 2013–2014 гг.

АА в области формирования могут достигать 300 км в поперечнике. По мере движения этот размер уменьшается до 30–50 км на стадии распада. Средняя трансляционная скорость равна $U=1-2$ км/ст, а орбитальная скорость у поверхности $V=0,2-0,6$ м/с. Число Россби имеет

порядок 0,05–0,1. Аномалии уровня моря вблизи центра 0,1–0,4 м. Параметр нелинейности V/U превышает 10, что означает, что АА являются ярко выраженными когерентными структурами, несущими массу, энергию и свойства воды. Объем вихря глубиной $H=2$ км с радиусом на поверхности $R=100$ км равен 3×10^4 км³. Мгновенный перенос таким вихрем составляет 3 Св. АА несут теплую и соленую мезотермальную воду в промежуточном слое. Они являются основным источником этой воды для западных пограничных течений. После долгой одиссеи по северной Пацифике эта теплая соленая вода возвращается к своему источнику во фронтальной зоне Куро-Ойясио, замыкая субарктический круговорот.

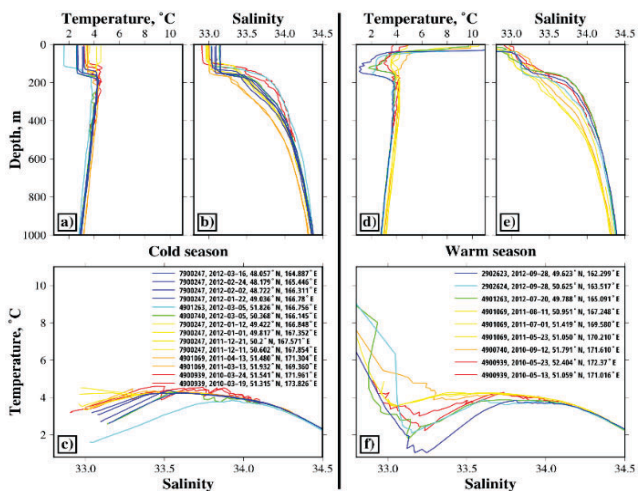


Рис. 3. Профили температуры, солености и Т–S диаграммы в холодное (ноябрь–апрель) и теплое время года (май–октябрь) в АА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Prants, S. V., Uleysky, M. Yu., Budyansky, M. V. Lagrangian oceanography: large-scale transport and mixing in the ocean / S. V. Prants, M. Yu. Uleysky, M. V. Budyansky. - Berlin, New York : Springer Verlag, 2017. - 271 p.
2. Saito, R., Yasuda, I., Komatsu, K., Ishiyama, et al. Subsurface hydrographic structures and the temporal variations of Aleutian eddies / R. Saito, I. Yasuda, K. Komatsu, H. Ishiyama, et al.// Ocean Dynamics. - 2016. - V.66. - Is.5. - P. 605–621.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРКАЛИБРОВКИ ПРОЗРАЧНОМЕРОВ ПУМ-200 И LISST-Tau

Артемьев В.А.¹, Глухов В.А.¹, Глитко О.В.¹, Павлова М.А.^{1,2},
Клювиткин А.А.¹

¹ *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01,
artemiev195@yandex.ru*

² *Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), Институтский переулок,
д.9, 141701, г. Долгопрудный, Московская область, 8(495)408-
45-54*

METHODOLOGY AND RESULTS OF INTERCALIBRATION OF PUM-200 AND LISST-Tau TRANSMISSOMETERS

Artemiev V.A.¹, Gluhov V.A.¹, Glitko O.V.¹, Pavlova M.A.^{1,2},
Klyuvitkin A.A.¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research
University), Institutsky Lane, 9, 141701, Dolgoprudny*

В статье приведены сравнительные данные аналогичных по техническим характеристикам прозрачномеров: ПУМ-200, разработанного в ИО РАН, и LISST-Tau, производства фирмы Sequoia Scientific Inc., USA. Описана методика интеркалибровки и результаты натуральных испытаний.

The article presents comparative data of transmissometer with similar technical characteristics: PUM-200, developed at the IO RAS and LISST-Tau, manufactured by Sequoia Scientific Inc., USA. The intercalibration technique and the results of field tests are described.

Оба прибора предназначены для измерения показателя ослабления света морской водой. LISST-Tau является оптическим датчиком и начинает измерения после подачи напряжения питания. Результаты измерений могут выводиться в аналоговом – только пропускание, или цифровом виде – показатель ослабления или пропускания, и регистрируются на внешнем профилирующем устройстве. ПУМ-200 полностью автономный прибор,

позволяющий проводить измерения показателя ослабления и температуры в зависимости от глубины погружения [1]. Оптическая схема и компоновка ПУМ-200 совпадает с прозрачномерами ПУМ и ПУМ-А и была запатентована в 2006 году [2]. ПУМ-200 позволяет проводить измерения на 3 оптических базах: это 0,6 и 0,2 и 001 метра, что позволяет перекрыть практически весь диапазон изменений показателя ослабления природных вод. Погрешности измерений за счет многократного рассеяния, были рассчитаны методом Монте-Карло и приведены в [3].

Оба прибора построены по двухканальной оптической схеме с одним источником света, опорный канал расположен внутри прибора. У LISST-Tau 2 фотоприемника: измерительный и опорный. Температурная стабильность измерений поддерживается цифровой электроникой с высоким разрешением, которая поддерживает заводскую калибровку во всем диапазоне рабочих температур. Для минимизации аппаратной нестабильности в ПУМ-200 используется один фотоприемник, на который через оптический модулятор поступает последовательность 4 световых потоков, соответствующих каналам: измерительному, опорному, внешней засветки и темновому.

Сравнительные технические характеристики прозрачномеров:

Параметр	ПУМ-200	LISST-Tau
Рабочая длина волны, нм	525	532
Полоса пропускания, нм	25	10
Диапазон измерений, м ⁻¹	0 – 10 (100)	0-30
Долгосрочная стабильность, м ⁻¹	0,005 (0,2)	0,00023
Апертура приемника, °	0,3°	1°
Оптическая база, м.	0,01, 0,2, 0,6	0,15
Частота дискретизации, Гц	1 - 15	1
Максимальная глубина погружения, м	200	2000
Рабочая температура, °С	- 2 - +32	- 2 - +40
Вес в воде, кг	1,3	0,59
Время автономной работы, ч	10	-

Основными преимуществами LISST-Tau является заявленная высокая «долгосрочная стабильность», и глубина погружения, которые существенно превышают аналогичные данные ПУМ-200. Главный недостаток – фиксированная частота дискретизации, т.е. LISST-Tau выдает одно значение в секунду, что существенно ограничивает разрешение по глубине и/или скорости зондирования. Преимущества ПУМ-200 –

возможность автономной работы в водах любой мутности при высокой частоте дискретизации.

Интеркалибровка была проведена в первом этапе 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море 10.09.2022 г., на ст. 7440. К сожалению, не удалось подключить LISST-Tau через штатный интерфейс RS-232 к зонду, что исключило прямую регистрацию показателя ослабления, поэтому использовался аналоговый выход с информацией о пропускании. Для питания и регистрации информации LISST-Tau устанавливался горизонтально на корзине и подключался к зонду SBE 25, который работал в автономном режиме. Для проведения интеркалибровки, приборы были подвешены на тросе (рис. 1, слева). Зондирование производилось на скорости $\sim 0,5$ м/сек, при этом на один отсчет LISST-Tau приходилось около 5 отсчетов ПУМ-200. После пересчета данных LISST-Tau из пропускания в показатель ослабления, результаты измерений 2 приборов были сведены на одном графике и представлены на рис. 1, справа, где также показан профиль $\Delta = C_{ПУМ} - C_{LISST}$ в m^{-1} .

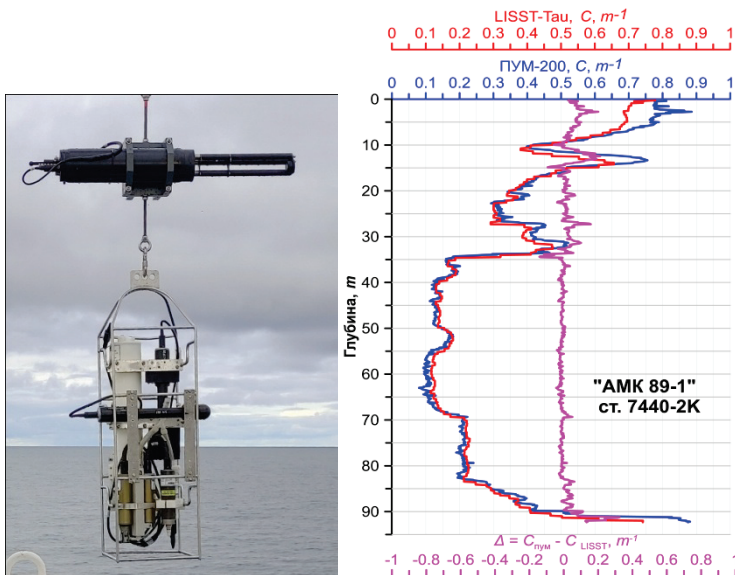


Рис. 1. Прозрачномер ПУМ-200 и зонд SBE 25 перед погружением (слева), результаты интеркалибровки (справа).

В области малых значений показателя ослабления ($c(530) \sim 0.12 m^{-1}$), величина Δ не превышает $0,001 m^{-1}$. Максимальные

значения Δ были получены при высоких значениях $c(530) \sim 0,9 \text{ м}^{-1}$, при этом на однородных участках профиля $\Delta \leq 0,09 \text{ м}^{-1}$, на стратифицированных, за счет низкой частоты дискретизации LISST-Tau, достигает значения Δ составило $0,2 \text{ м}^{-1}$. В среднем значение разности показаний $C_{ПУМ} - C_{LISST}$ по всему профилю составляет $0,016 \text{ м}^{-1}$. Проведенные измерения были сделаны впервые и показали максимальное расхождение результатов измерений двух прозрачномеров $\leq 10\%$. Стали понятными пути дальнейшего совершенствования методики интеркалибровки. Для уменьшения погрешностей измерений, связанных с низкой частотой дискретизации LISST-Tau, желательно проводить натурные испытания в водах со слабой стратификацией. Также необходимо провести измерения в экстремально мутных водах с показателем ослабления, близким к 30 м^{-1} для оценки расхождения во всем динамическом диапазоне LISST-Tau.

Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0001. Обработка данных проводилась по гранту РФФИ № 21-77-10059.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Таскаев В.Р. Прозрачномер морской воды. Патент на изобретение RUS 2341786 21.12.2006.
3. Буренков В.И., Шеберстов С.В., Артемьев В.А., Таскаев В.Р. Оценка погрешности измерения показателя ослабления света морской модой в мутных водах арктических морей // Светотехника, 2019, №2. С. 55-60.

О ДИНАМИКЕ ВОД В ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ.

Амбросимов А.К., Витинг К.Б., Демешко Д.М., Швед В.А.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ambrosimov@ocean.ru

ON THE DYNAMICS OF WATER IN THE SOUTHERN PART OF THE KARA SEA.

Ambrosimov A.K., Viting K.B., Demeshko D.M., Shved V.A.

В работе представлены материалы экспедиционных исследований в юго-западной части Карского моря. Показано, что в этом районе моря наблюдается высокая изменчивость TS-характеристик, вызванная смешением вод различного происхождения и воздействием полусуточные приливных течений.

The paper presents materials of expeditionary research in the southwestern part of the Kara Sea. It is shown that in this area of the sea there is a high variability of TS-characteristics caused by the mixing of waters of different origin and the impact of semidiurnal tidal currents.

Анализ CTD-параметров вод и течений на двух зональных разрезах в южной части Карского моря, проведенных в 89-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» показал, что часть Баренцевоморского потока, помимо проникновения в Байдарацкую губу, поступает в Карское море, где у п-ова Ямал вливается в Ямальское течение и движется на север. Распределение температуры и солёности в восточных частях обоих зональных разрезов в южной части моря (рис.1а) показало, что наблюдается тенденция к увеличению первой и уменьшению второй (рис.1б), в связи с поступлением в эту часть моря более теплого и распресненного потока Обь-Енисейских вод.

Распределение температуры по зональным разрезам показало уменьшение температуры в западном направлении на величину около 2°C, а изменение солёности от 32 до 34‰. Толщина верхнего перемешанного слоя в восточной части южного разреза составила 20 м (ст.7439-7448), а при приближении к о. Новая Земля (ст.7449-7451) уменьшилась до 10-12 м. На северном разрезе (рис.1а) толщина верхнего перемешанного слоя варьировала в пределах 16 м.

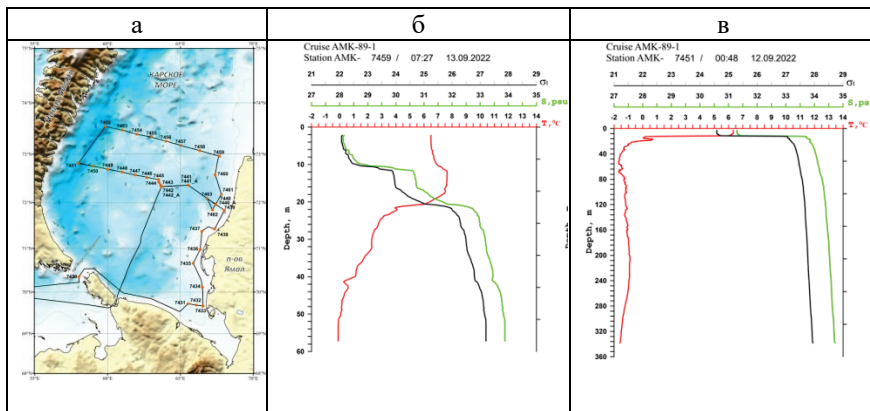


Рис.1. Карское море: а) Карта-схема маршрута экспедиции 1-ой части 89-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш»; б,в) вертикальное распределение STD-параметров водной толщи в восточной и западной частях разреза

На восточных станциях 7459 и 7461 наблюдалось воздействие распресненного стока Обь-Енисейского течения на структуру водных масс южной части Карского моря, так на восточной станции северного разреза (ст.7459) соленость верхнего слоя опускалась до 28‰, а на западе разреза соленость составила 32‰ (рис.2).

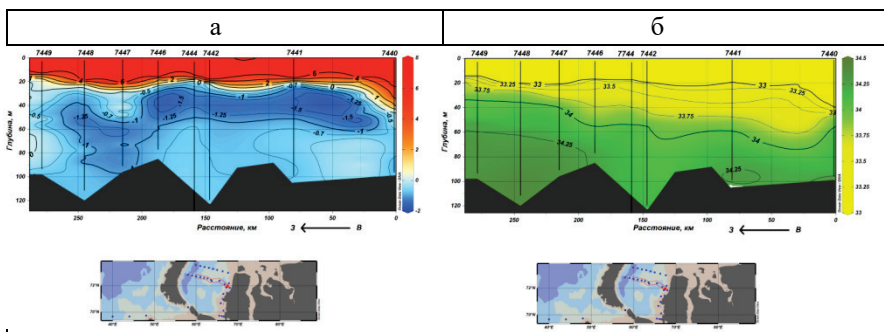


Рис.2. Распределение: а) температуры и б) солености по «южному» зональному разрезу в Карском море (10-11.09.2022). АА

Осредненные оценки скоростей переноса вод по трассам «южного» и «северного» осредненные разрезов показали, что последние были незначительными и разнонаправленными и только в центральной части

моря (рис.3а) были зарегистрированы два узких потока противоположных направлений со скоростями 10-20 см/с. В Восточно-Новоземельской впадине наблюдался поток с относительно постоянной скоростью около 15 см/с северного направления. В 2019-2021 гг. здесь также регистрировались два встречных течения – в верхнем 20-м слое южного направления, а ниже – северного.

На рис.3а представлены мгновенные измерения течений по трассе движения судна на разрезах, а на рис.3 б,в – вертикальные распределения STD параметров в западной и восточной частях разрезов.

Разнонаправленность течений на разрезах может быть связана с поступлением и перераспределением вод западной ветви Обь-Енисейского течения. Отметим, что наблюдения, выполняемые с помощью судового SADCР, являются мгновенными и не отражают в целом картины течений, поэтому, для оценки изменчивости процесса переноса осадочного материала во времени необходимы долговременные наблюдения.

Наблюдения за процессом переноса вод и взвешенного материала на ст.7441 в течение 86-часового периода показали высокую перемежаемость течений в толще моря, которая вызвана взаимодействием вод различного происхождения. При этом, если общая длина движения вод за 86 часов относительно точки наблюдения составила 21.6 км, то географический перенос – всего 2,7 км в северо-восточном направлении

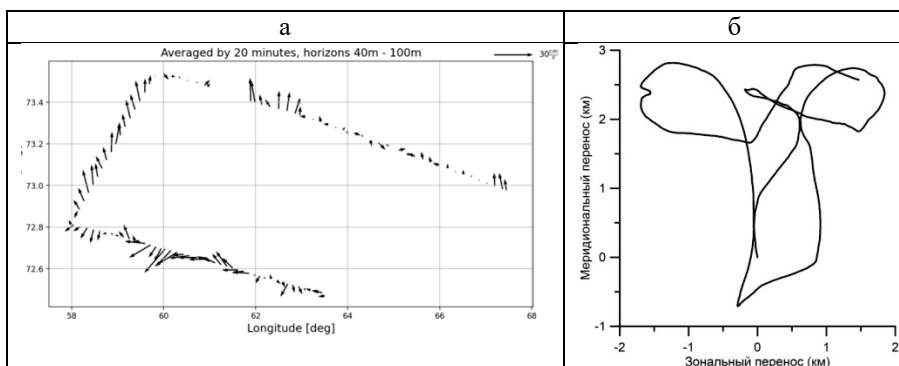


Рис.3. Перенос водных масс: а) по разрезам; б) траектория переноса водной массы в юго-восточной части Карского моря (стрелки показывают географическое направление течений).

Выводы

В южной части Карского моря у западного побережья п-ва Ямал и о. Белый наблюдается высокая перемежаемость течений, вызванная смешиванием вод различного происхождения: Ямальского течения,

Баренцевоморских вод, вод Восточно-Новоземельского течения и распресненных вод Обь-Енисейского течения.

Высокая перемежаемость и относительно высокие скорости переноса вод в различных направлениях, практически, не влияют на небольшой результирующий перенос вод в северо-восточном направлении.

На перенос вод значительное влияние оказывают полусуточные приливные волны.

Большое различие в температуре и солёности между восточной и западными частями южной части моря связано с проникновением в южную часть моря распресненных вод Обь-Енисейского и Ямальского течений.

УДК 551.465

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПЕРЕНОСА ВОДНЫХ МАСС В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ

Амбросимов А.К., Ковалев Г.А., Пронина Ю.О.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, ambrosimov@ocean.ru

ON THE DYNAMICS OF WATER MASSES IN THE STATE ANNA TRUNK

Ambrosimov A.K., Kovalev G.A., Pronina Yu.O.

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, ambrosimov@ocean.ru
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

В работе представлены результаты гидролого-гидрофизических наблюдений на разрезе в желобе Святой Анны по 82° с.ш. в октябре 2021 г. Показано, что по разрезу наблюдаются водные массы с различными T-S характеристиками, а на восточном борту желоба – взаимодействие двух встречных потоков с различными типами водных масс вод.

The paper presents the results of hydrological and hydrophysical observations on the section in the St. Anna Trough along 82° N. latitude. in October 2021. It is shown that water masses with different T-S characteristics are observed along the section, and on the eastern side of the trench, the interaction of two counterflows with different types of water masses is observed.

Желоб Св.Анны представляет собой часть арктического бассейна, где встречаются две ветви атлантического течения, одна из которых из Гренландского и Норвежского морей через пролив Фрама по континентальному склону бассейна Нансена попадает в желоб Св.Анны, а вторая достигает его после прохождения через Баренцево море. В силу этих причин они отличаются своими T-S характеристиками. Происходящая в настоящее время климатическая перестройка влияет на тепло- и массоперенос в этих ветвях, поэтому изучение малых изменений в Арктике очень важно для прогноза их в будущем. Исследования солености и температуры позволяют выделить водные массы и проследить их происхождение, а данные о химическом составе вод являются не только хорошими трассерами водных масс, но по ним с определенной степенью точности можно определить возраст вод, т.е., как давно данная водная масса потеряла контакт с атмосферой и погрузилась на глубину и др., поэтому данная работа посвящена изучению динамики типизации вод в желобе Св.Анны с целью изучения ее влияния на климатические изменения.

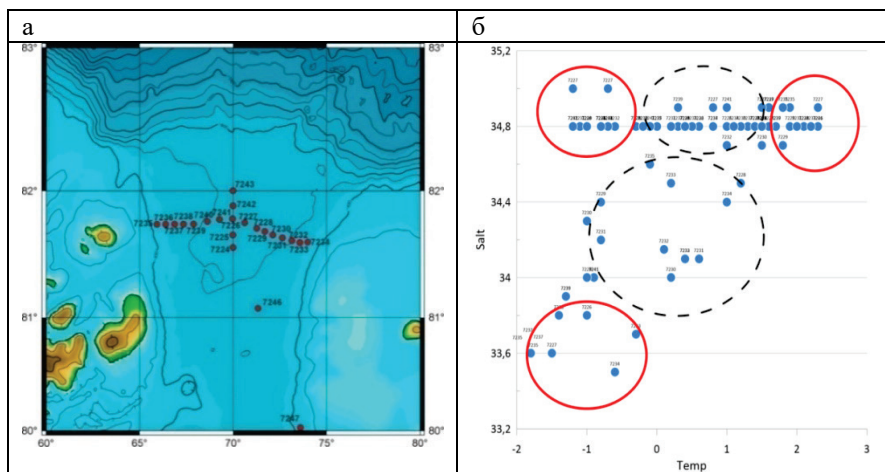


Рис. 1. а) Карта-схема океанологических станций и разреза в желобе Св.Анны; б) диаграмма T-S параметров по разрезу (цифрами показаны номера станций).

Океанологические исследования в желобе Св.Анны были выполнены в 86-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на 20-ти станциях

зонального разреза по 82° с.ш. с 18 по 21 октября 2021 г. от западного до восточного бортов желоба Св.Анны (рис.1а). Наблюдения в западной части разреза (ст.7235-7243) показали (рис.1б), что TS диаграммы и вертикальные распределения температуры и солёности здесь на всем простирании имеют схожие характеристики и эта область водной толщи может быть охарактеризована как относительно однородная. По гидрофизическим признакам переноса водные массы на разрезе можно разделить на четыре группы (рис.2): первая – это западная часть разреза, которая характеризуется слабым разнонаправленным движением вод; вторая – начало восточной половины разреза (ст.7227-7231), где скорость переноса усилилась и движение вод выстроилось в строго юго-западном направлении со скоростями 20-25 см/с; третья – это следующие к востоку две ст.7231-7232, где началась масштабная перестройка вертикальной гидрологической структуры водных масс и высокая изменчивость скорости и направления движения вод; четвертая – это две крайние восточные станции ст.7233-7234.

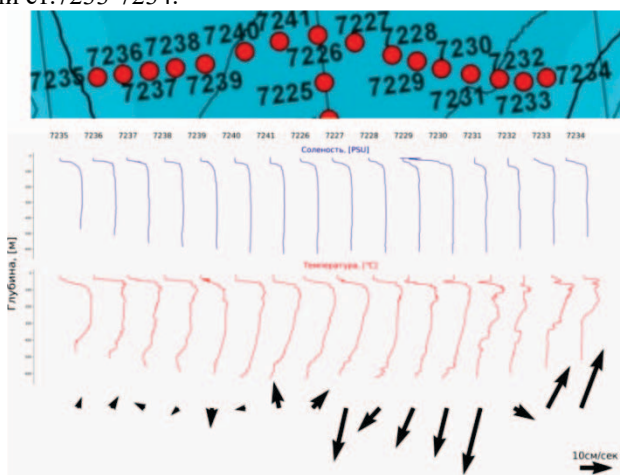


Рис. 2. Распределение солёности, температуры, скорости и направления течения по глубине на зональном разрезе в желобе Св.Анны 18-19 октября 2021 г.

На этих станциях завершилась перестройка вертикальной гидрологической структуры – произошел подъем холодных придонных вод с 550-500 м до глубины 280-350 м, а перенос вод принял строго северо-восточное направление со скоростями до 25 см/с. По характеристикам воды можно отнести к баренцевоморским.

Анализ распределения температуры, солености и течений по глубине, а так же анализ T-S диаграмм (рис.3) позволил выделить, как минимум, три типа водных масс по глубине и два противоположнонаправленных потока на рассматриваемом разрезе:

- поверхностные воды – холодные и минимально соленые воды в западной части разреза в районе ст.7232-7265 с ядром в точке ст.7237 на горизонте 25 м, которые отражают близость к разрезу тающих ледников Земли Франца-Иосифа;

- придонные воды, предположительно баренцевоморские водные массы, – холодная и соленая водная масса на глубине 300-600 м с ядром в точке ст.7227 на горизонте 551 м;

- фрамовская ветвь атлантических водных масс (АВМ) – теплые и соленые воды на глубине 100-500 метров с ядром в точке ст.7227 на глубине 140 м.

- в восточной части разреза наблюдались два потока противоположных направлений – западный (ст.7227-7231), двигался в юго-западном направлении, а второй, восточный (ст.7233-7234), в северо-восточном.

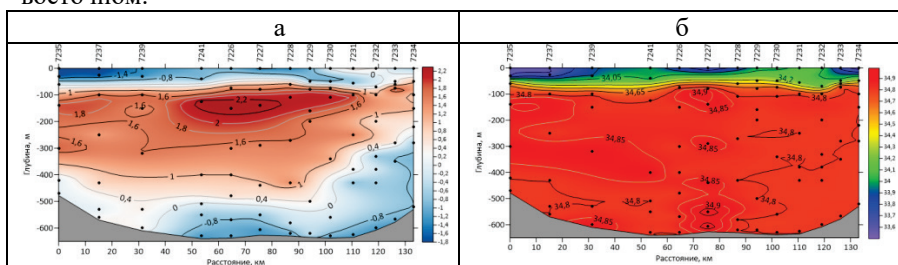


Рис. 3. Распределение температуры ($^{\circ}\text{C}$) и солености (‰) в водной толще на разрезе через жёлоб Св. Анны.

Изменчивость гидрофизической обстановки в районе исследований была оценена по изменению характеристик, полученных в одной точке в разное время. Так, наблюдения, выполненные в одной и той станции под №№ 7226 и 7241, разнесенной по времени наблюдений на 1.5 суток показали, что при примерно равной величине скорости переноса, направление течения изменялось до 80° , т.е. изменчивость течения была довольно значительная.

Наблюдения, выполненные на станциях в центральной и южной частях желоба и прилегающих акваториях Карского моря (рис. 1а) показали, что здесь T-S диаграммы подобны между собой и, что указывает на принадлежность их к водам Карского моря

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ КОНВЕКЦИИ

Куприянова А.Е.^{1,2}, Гриценко В.А.¹

¹*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-59-96*

²*Балтийский федеральный университет им. И.Канта,
236016, Калининград, ул. А.Невского, 14, 8(4012)59-55-95
kupriyanova_ae@mail.ru, gritsenko-vl-al@mail.ru*

LABORATORY RESEARCH OF FREE CONVECTION

Kupriyanova A.E.^{1,2}, Gritsenko V.A.¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University,
14, st. A.Nevskogo, Kaliningrad, 236016*

В работе подробно описаны лабораторная установка и методика выполнения экспериментов. Представлены результаты экспериментального изучения сезонного выхолаживания приповерхностных вод.

The laboratory setup and the method of performing experiments are described. The results of an experimental study of seasonal cooling of near-surface waters are presented.

Общие черты проникновения холода в виде погружающихся с поверхности малых объемов холодных вод, их смешения с подстилающими водами в глубину уже описаны. В работах [1-5] исследованы различные аспекты данного явления. Вместе с тем, полнота понимания процессов распада, взаимодействия и слияния возникающих и погружающихся объемов не достигнута.

Целью работы стало описание методики и результатов лабораторного моделирования процессов погружения с поверхности малых объемов воды с отрицательной плавучестью (пятен), их распада на более мелкие части и взаимодействия между собой.

Лабораторная установка представляет собой прямоугольный бассейн с размерами рабочего пространства $80 \times 60 \times 12,5$ см. Металлический каркас обеспечивает жесткость конструкции, а боковые стенки из витринного стекла (6 мм) позволяют получать снимки высокого качества. Установка оснащена системой светодиодных ламп. Фото-регистрация выполняется цифровыми камерами Canon-450D и Sony- α 58 (20 Мп), а также видеокамерой Baumer-VCXU-23M с частотой от 10 Гц и более. В экспериментах используется солевой вариант создания отрицательной плавучести у пятен с диапазоном от $5 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-3} г/см³ и подкраской при помощи пищевых красителей. Общий вид установки приведен на рисунке 1.

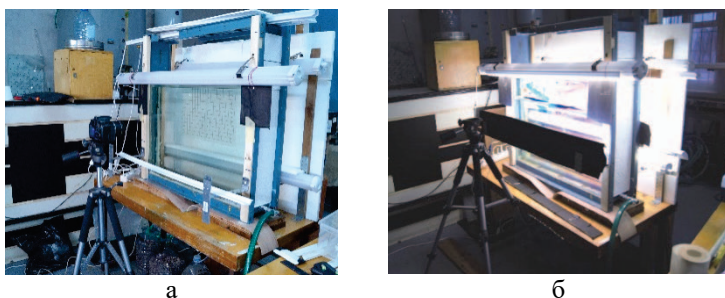


Рис. 1. Подготовка к рабочей съемке экспериментов (а) и вариант лотка с размещением наклонного дна (б).

Для создания в поверхностном слое пятен соленой воды применялось два типа входных устройств – «воронка» и «окно» (рис. 2). При изготовлении первого использовалась пластиковая воронка, которая заполнялась сортированным мелкозернистым песком (1-2 мм) или очень крупным песком (3-4 мм) для минимизации проникновения возмущений с поверхности воды в глубину при капельной подаче соленой воды во входное устройство. Для позиционирования «воронки» на поверхности воды они встраивались в пенополистирольный лоток (225×105 мм). Входное ($d_{\text{внутр}}=25$ мм) и выходное ($d_{\text{внутр}}=6$ мм) отверстия воронки закрывались сеткой (номинальный размер отверстия 333 мкм), а заглубление выходного отверстия «воронки» составляло 20 мм. Данный тип входного устройства успешно использовался в создании пятен с объемом в 2-3 см³, что позволило изучать их эволюцию при погружении в подстилающую пресную воду и движение по склону дна [5]. В частности, были получены обычно наблюдаемые в экспериментах: грибовидная форма пятна, появление вихревого кольца и его распад (рис. 3 а).

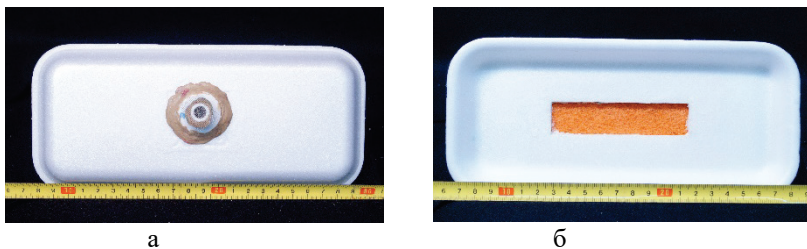


Рис. 2. Общий вид входных устройств: а – «воронка», б – «окно», встроенные в пенополистирольный лоток.

Использование склона дна позволило расширить диапазон решаемых задач, в том числе исследовать движение отдельных пятен по нему и их взаимодействие между собой (рис. 3 б).

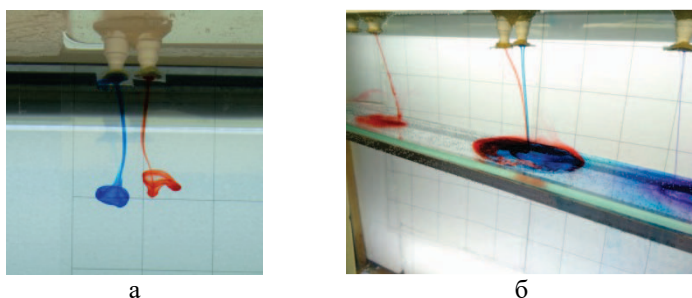


Рис. 3. Общий вид движения отдельных пятен соленой воды, запускаемых через входное устройство типа «воронка», при их погружении в пресной воде (а) и движению по склону дна (б).

Для изготовления второго типа входного устройства использовался пенополистирольный лоток с вырезанным по центру окошком размером 90×15 мм, которое с нижней поверхности лотка закрывалось абразивной губкой или сеткой (рис. 2 б). Такой тип устройства формировать распределенный по поверхности тонкий слой соленой воды, моделирующий возникновение «дождика» из множества маленьких пятнышек соленой воды (рис. 4 а). На рисунке 4 отчетливо различим хаотический характер формирования множества пятнышек. Сочетание формирования «дождика» пятен с наклонным дном позволило смоделировать появление вдольсклонового течения соленой воды, как итога объединения малых пятен соленой воды в общее движение по склону дна (рис. 4 б).

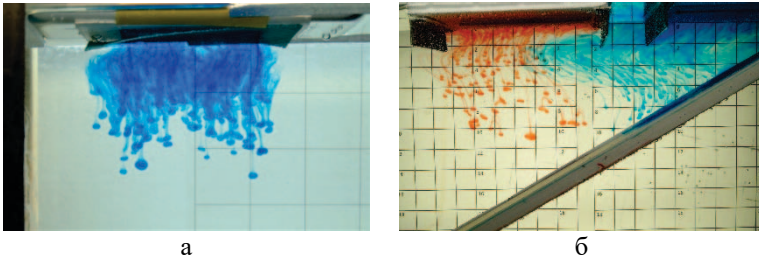


Рис. 4. Формирование в поверхностном слое множества малых пятен соленой воды (а) и возникновение вдольсклонового течения (б).

Лабораторные эксперименты позволили изучить, на качественном уровне, основные этапы погружения и трансформации формы пятен соленой воды в окружении пресной. Использование серийной съемки фотоаппаратом (2 Гц) и видеокамерой (10 Гц) позволило получить количественные оценки скорости погружения пятен. Оказалось, что использование разных по конструкции входных устройств позволяет более точно описать трансформации объемов холодной воды на конкретном этапе эволюции процесса выхолаживания воды с поверхности.

Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012) (разработка методики проведения экспериментов и лабораторной установки), а также при частичной поддержке гранта РФ №23-27-00150 (съемки видеокамерой и количественные оценки динамики пятен).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Fer, I., Lemmin, U. Winter cascading of cold water in Lake Geneva *Limnol. Oceanogr.*, 47(2). 2002. P. 535-544.
2. Скорер, Р. Аэрогидродинамика окружающей среды. М: МИР. 1980. 549 с.
3. Тернер, Дж. Эффекты плавучести в жидкости. М: МИР.1977. 431 с.
4. Федоров, К. Н., Гинзбург, А. И. Приповерхностный слой океана. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 303 с.
5. Куприянова, А. Е., Гриценко, В. А. Лабораторное и численное исследование особенностей процесса выхолаживания воды с поверхности в прибрежных водах // *Изв. РАН. ФАО*. 2021. Т. 57. №4. С. 484-494.

АВТОНОМНЫЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ОБРАТНОГО АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ AQUASOUND

Соловьев В.А.¹

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(916)671-21-28,*

sol@ocean.ru

**AUTONOMOUS MULTI-FREQUENCY ACOUSTIC
BACKSCATTER AQUASOUND.**

Solovyev V.A.¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia*

В статье описывается архитектура нового прибора для регистрации обратного акустического рассеяния в водных слоях до глубины 300 метров на высоких частотах от 300 кГц до 4 МГц.

Paper presents a new instrument for measuring sound scattered in the water column to a depth 300 m at high frequencies from 300 kHz to 4 MHz.

Исследование звукорассеивающих слоев методом регистрации высокочастотного обратного акустического рассеяния позволяет исследовать поведение мелких морских организмов, концентрацию твердых взвесей, мелкомасштабную изменчивость морской среды.

В то же время на рынке представлено ограниченное число автономных приборов для регистрации обратного акустического рассеяния на нескольких высоких частотах в водной среде. Наиболее известным прибором является AQUAscat который производится компанией Aquatec. AQUAscat может комплектоваться четырьмя трансдюсерами с частотами от 300 кГц до 5 МГц. Размер ячейки AQUAscat может варьироваться от 2.5 мм до 4 см. Такой размер ячейки хорошо подходит для изучения концентрации мелкой взвеси в водной толще, но их объем недостаточен для исследования распределения зоопланктона. Ранее выпускался компанией Tracog Inc. измеритель обратного акустического рассеяния TAPS. Он был ориентирован на изучение распределений именно зоопланктона в водной среде. Прибор имел измерительную ячейку длиной до 60 см или 3 литров в объеме. Сейчас его производство прекращено.

Aquasound является универсальным прибором с возможностью программирования размера ячейки и частоты импульсов в широких пределах. Прибор позволяет излучать ультразвуковые импульсы различных

частот в воду и записывать амплитуду отраженного сигнала. Его функциональная схема представлена на рис.1.

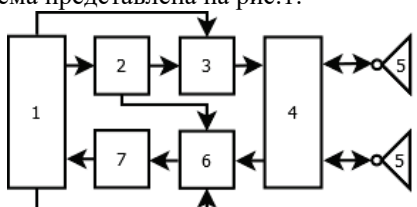


Рис. 1. Функциональная схема Aquasound: 1 – микроконтроллерный блок управления с АЦП, 2 – генератор сигналов, 3 – передатчик, 4 – коммутатор и блоки согласования сопротивлений преобразователей, 5 – пьезоэлектрические преобразователи (трансдюсеры), 6 – приемник, 7 - детектор

Блок управления реализован с использованием 32-битного ARM Cortex-M4 микроконтроллера. На его плате находится высокоскоростная АЦП с частотой дискретизации до 1 миллиона отсчетов в секунду (MSPS). Блок управления позволяет программировать частоту излучаемых импульсов, частоту их следования, размер и количество измерительных ячеек. Информация сохраняется на карте микро SD. Программируется прибор через гальванически развязанный интерфейс RS-232, или по технологии беспроводного соединения Bluetooth.

Генератор сигналов блок 2 реализован с использованием микросхемы прямого цифрового синтеза (DDS). С помощью него формируются излучаемые импульсы и сигнал в гетеродине приемника.

В передатчике блок 3 применен двухтактный трансформаторный усилитель мощности. Выходных тороидальных трансформаторов два, один для излучаемых импульсов от 300 кГц до 800 кГц, второй для частот от 1 МГц до 4 МГц. Это обусловлено необходимостью применять разные марки ферритовых колец для низких и высоких частот. Выходная мощность усилителя в импульсе составляет около 90 Ватт.

Для минимизации отражений сигнала и, как следствие, максимизации передачи мощности в нагрузку используются цепи согласования импедансов. Каждый преобразователь согласуется в блоке 4 с помощью LC цепи, которая состоит из одного конденсатора и двух индуктивностей. Комплексный импеданс преобразователя измеряется с помощью векторного анализатора цепей (VNA). По комплексному импедансу рассчитываются параметры LC цепи согласования. В Aquasound импеданс преобразователей приводится к активному сопротивлению 50 Ом. Это входное сопротивление приемника и выходное сопротивление передатчика.

Эхосигнал, создаваемый преобразователем в результате реверберации планктона, находится в диапазоне от микровольт до милливольт. Поэтому приемник блок 6 реализован с малым собственным шумом. Его динамический диапазон составляет 75 дБ. В усилительных каскадах используются широкополосные малозумящие операционные усилители. Приемник является супергетеродинным, преобразование частоты выполняется в промышленном двойном балансном диодном смесителе. Использование аналогового смесителя позволило отказаться от применения дорогих высокоскоростных АЦП и цифровой обработки сигналов (ЦОС) на ПЛИС.

Сигнал промежуточной частоты (ПЧ) частотой 28 кГц после фильтрации и усиления поступает на детектор огибающей блок 7. Детектор реализован на микросхеме, определяющей истинное среднеквадратическое значение (true RMS) с высокой точностью. Сигнал после детектора поступает на вход АЦП в микроконтроллерном блоке управления.

Для проведения тестирования преобразователя было изготовлено два пьезоэлектрических преобразователя один на рабочую частоту 2 МГц, второй 410 кГц. В качестве активного материала для преобразователей используются диски из пьезокерамики PZT-4 диаметром 28 мм, толщиной 1 мм для частоты 2 МГц. Для частоты 410 кГц диск диаметром 50 мм и толщиной 5 мм. Рабочие частоты выбраны в промежутке между резонансной и антирезонансной точками при толщинной моде вибрации диска. Корпуса преобразователей были изготовлены из ABS пластика с применением FDM 3d принтера. Для увеличения амплитуды сигнала используется демпфирующий слой на задней поверхности диска и согласующий четвертьволновой спереди [2]. В качестве демпфирующего слоя применяется трансформаторная бумага для высоких частот и измельченная спрессованная крошка коры пробкового дерева для низких.

Регистрация глубины выполняется с помощью датчиков давления с цифровыми выходами TE MS5837, или Keller PA-7LD. Элементы электронной схемы размещены на сборке из трех четырехслойных печатных плат ее размер 140x50x45 мм. В батарейном блоке Aquasound используются 15 Li-ion элементов типа 18650. Корпус прибора изготовлен в виде цилиндра размером 550x100 мм из пластика - полиацетали (POM) его максимальная рабочая глубина составляет 500 метров.

Испытания прибора были проведены в октябре 2022 года в Южном отделении ИО РАН г. Геленджик. Aquasound был укреплен на металлической раме, на ней же были размещены акустический доплеровский измеритель течения Aquadopp и подводная камера с разрешением 2 мп. На МНИС «Ашамба» на траверзе Голубой бухты с помощью лебедки выполнялось зондирование до глубины 200 метров.

Регистрация сигнала производилась Aquasound на частотах 410 кГц и 2 МГц и с помощью прибора Nortek Aquadopp на частоте 2 МГц. По результатам зондирований установлено, что Aquasound получал резкое увеличение амплитуды сигнала на двух частотах на глубине, соответствующей изопикне 15.6. На этой изопикне согласно [1] регистрируется слой увеличенной концентрации зоопланктона в дневное время. Сигнал с частотой 2МГц, полученный Aquasound, коррелирует с сигналом Nortek Aquadopp. Сигналы с частотой 2 МГц и 410 кГц имеют отличия. Результаты испытаний подтвердили все характеристики прибора по регистрации сигналов обратного акустического рассеяния на нескольких частотах.

В дальнейшем планируется изготовление преобразователей на других частотах, их калибровка, а также установка Aquasound на заякоренный профилограф “Аквалог” [3].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ostrovskii A. G., Arashkevich E. G., Solovyev V. A., Shvoev D. A. Seasonal variation of the sound-scattering zooplankton vertical distribution in the oxygen-deficient waters of the NE Black Sea // *Ocean Science*, 2021, 17, pp. 953–974
2. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. // М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
3. Островский А.Г., Зацепин А.Г., Соловьев В.А., Цибульский А.Л., Швоев Д.А. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*, 2013, Т.53, №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЗИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ АКВАТОРИИ НА ШЕЛЬФЕ АБХАЗИИ ЛЕТОМ 2021 Г.

Химченко Е.Е.¹, Серебряный А.Н.^{1,2}, Попов О.Е.³, Белов Д.В.¹, Тарасов
Л.Л.², Нешенко И.П.⁴, Кенигсбергер Г.В.⁴

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-61-49,
ekhyt@ocean.ru*

²*АО "Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева"
ул. Шверника, д. 4, 117036, г. Москва*

³*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
Пыжевский переулок, д.3, 119017, г. Москва*

⁴*Институт экологии Академии наук Абхазии
ул. Красномаяцкая 67, 384900, г. Сухум*

STUDY OF THE HYDROPHYSICAL VARIABILITY OF THE WATER AREA ON THE SHELF OF ABKHAZIA IN SUMMER OF 2021

Khimchenko E.E.¹, Serebryany A.N.^{1,2}, Popov O.E.³, Belov D.V.¹, Tarasov
L.L.², Neshenko I.P.⁴, Kenigsberger G.V.⁴

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

²*Andreyev Acoustics Institute, Shvernika st., 4, Moscow, 117036;*

³*Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Pyzhyovskiy per., 3, Moscow, 119017*

⁴*Institute of Ecology of the Academy of Sciences of Abkhazia, Krasnomayatskaya
st., 67, Sukhum, 384900*

Представлены результаты гидрофизических съемок прибрежных вод побережья Абхазии. Основные работы проводились в акватории м. Красный маяк и близ устья р. Кодор. Дополнительно были проведены съемки течений в Сухумской бухте, а также в районе р. Гумиста.

The results of hydrophysical surveys of the coastal waters of the coast of Abkhazia are presented. The main work was carried out in the water area of Cape Krasny Mayak and near the mouth of the river Kodor. Additionally,

surveys of currents in the Sukhumi Bay, as well as in the area of the Gumista river were carried out.

В июне 2021 г. на абхазском шельфе проводились исследования прибрежной динамики вод, которые являлись продолжением более ранних работ [1]. Основным местом наблюдений служил морской павильон Института экологии АНА (эстакада ИЭ АНА), расположенный на м. Красный маяк. Кроме того, измерения проводились в акваториях р. Кодор (20 и 26 июня), в бухте Сухумской (22 июня) и у р. Гумиста (27 июня). В абхазском регионе и, в частности, в Сухумской бухте постоянный мониторинг ведется преимущественно за изменчивостью температурного режима акватории [2, 3]. В наших исследованиях помимо постановок заякоренных цепочек, оснащенных датчиками температуры, проводились пространственные съемки течений с ADCP, а также гидрологическая съемка зондом miniSVP, измеряющим профили скорости звука и температуры.

Пространственная съемка в акватории м. Красный Маяк проводилась 18 и 22 июня. 18 июня направление течения было западным, а скорость до глубины 8 м составляла 0.1–0.2 м/с, глубже наблюдалось увеличение скорости до 0.4 м/с. Для данного района северо-западное направление течений является преобладающим. Значение сигнала обратного рассеяния во время съемки достигало 70 дБ от поверхности до 10 м, уменьшаясь с глубиной до 50 дБ. Такое распределение сигнала обратного рассеяния обусловлено большим количеством взвешенного вещества в верхнем деятельном слое моря.

Во время съемки 22 июня характер течений изменился. Наблюдалось восточное течение со скоростью 0.3–0.4 м/с. При этом на горизонте около 10 м прослеживалось более слабое (около 0.2 м/с) северо-западное течение. Глубже 12 м течение вновь было ориентировано на восток со средней скоростью 0.3 м/с.

По данным сигнала обратного рассеяния в верхнем 5-метровом слое наблюдалось его повышенное значение (65–70 дБ), близ эстакады максимальное (до 90 дБ), а в толще от 5–6 м до 40–45 м – минимальное (45–50 дБ), ближе ко дну значение обратного рассеяния вновь повышалось (до 60–65 дБ). Пространственное распределение сигнала обратного рассеяния (рис. 1) было следующим: восточная часть акватории отличалась более чистой водой (сигнал обратного рассеяния составлял 62–74 дБ), западная же имела большее количество взвеси (сигнал обратного рассеяния 82–90 дБ). Максимальное значение сигнала обратного рассеяния на западе могло быть вызвано распространением вод р. Гумисты, которая располагается примерно в 3-х км на запад от м. Красный маяк. Такому распространению

речных вод способствовало наблюдавшееся в этот день направление течений.

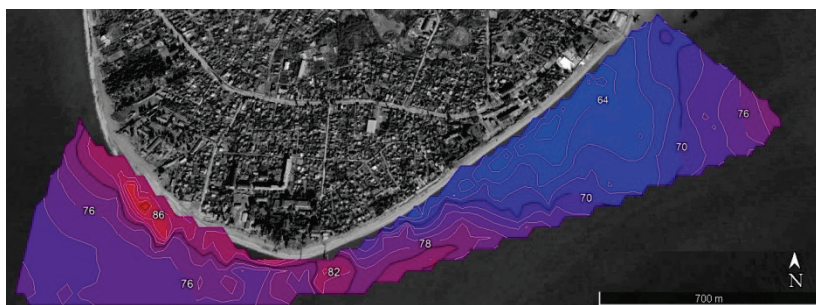


Рис. 1 Пространственное распределение сигнала обратного рассеяния в приповерхностном слое акватории м. Красный маяк 22 июня 2021 г.

Съемка в бухте Сухумской была проведена 22 июня во второй половине дня. Приповерхностное течение в западной части бухты было направлено преимущественно на юго-восток со скоростью 0.3 м/с (рис. 2).

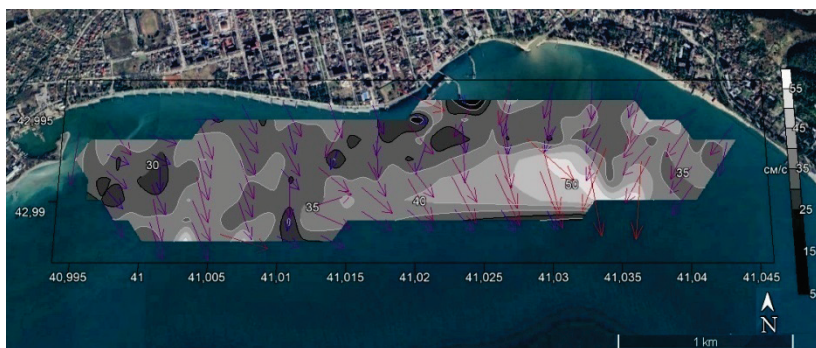


Рис. 2. Пространственное распределение направления и скорости течения в приповерхностном слое, Сухумская бухта 22 июня 2021 г.

В восточной части течение имело юго-западное направление со скоростью 0.3–0.4 м/с, в юго-восточной части отмечалось усиление до 0.5 м/с. Сигнал обратного рассеяния в приповерхностном слое достигал значений 70–76 дБ, с увеличением до 95 дБ в южной области. В западной части бухты течение имело юго-восточную направленность от поверхности до глубины 20 м, глубже оно имело юго-западную ориентацию. Скорость

течения в среднем для всей толщи составляла 0.2 м/с. Значение сигнала обратного рассеяния от поверхности до 20 м достигало 70 дБ, а глубже – 60 дБ.

В восточной части Сухумской бухты от поверхности до дна течение было юго-западным со средней скоростью 0.2 м/с (Рис. 3). Сигнал обратного рассеяния имел максимум 86 дБ в слое до 1 м, в приповерхностном слое (до глубины 4 м) его значение было в пределах 70 дБ, а глубже - до 60 дБ.

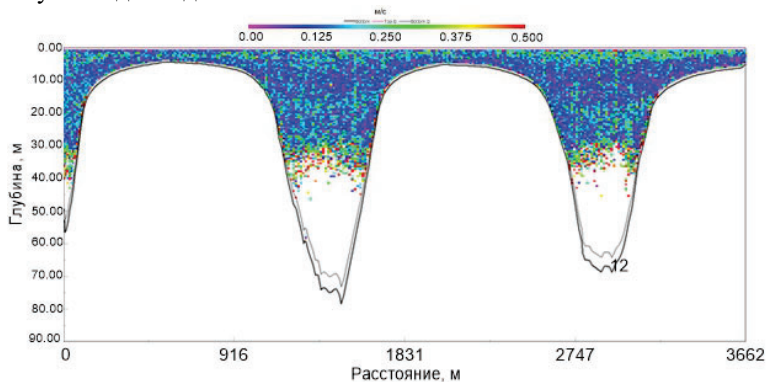


Рис. 3 Скорость течения от поверхности до дна в восточной части Сухумской бухты 22 июня 2021 г.

Работа выполнена в рамках темы госзадания Минобрнауки РФ № FMWE-2021-0010, обработка и анализ данных выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-00055.

ЛИТЕРАТУРА

1. Serebryany A., Khimchenko E., Popov O., Denisov D., Kenigsberger G. Internal Waves Study on a Narrow Steep Shelf of the Black Sea Using the Spatial Antenna of Line Temperature Sensors//Journal of Marine Science and Engineering. 2020, 8, 833; doi:10.3390/jmse8110833
2. Гицба Я. В., Строчан Т. П. Пространственное распределение поверхностной температуры воды в морской акватории Абхазии //материалы XIII международного симпозиума проблемы экоинформатики. – 2018. – С. 75–79.
3. Гицба Я. В., Строчан Т. П. Характеристика гидротермического режима территориальных морских вод Абхазии // В книге: Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Москва, 2022. С. 627-633.

“ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ” И ДРУГИЕ НЕЛИНЕЙНЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ НА СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ ШЕЛЬФЕ АВСТРАЛИИ

Серебряный А.Н.^{1,2}, Holloway Р.Е.³

¹*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-61-49,
serebryany@hotmail.com*

²*АО "Акустический институт им. акад. Н.Н. Андреева"
ул. Шверника, д. 4, 117036, г. Москва*

³*Школа географии и океанографии, Университетский колледж,
Университет Южного Нового Уэльса, Академия вооруженных сил
Австралии Канберра, АКТ 2600, Австралия*

Обсуждаются интенсивные нелинейные внутренние полусуточные волны на с-з шельфе Австралии на основе данных измерений временных рядов скорости и температуры, зарегистрированных на заякоренных станциях. Приведена статистика трансформаций типов внутренних приливов при их распространении по участку трассы от склона до шельфа.

Intense nonlinear internal semidiurnal waves on the s-west shelf of Australia are discussed on the basis of measurements of time series of velocity and temperature recorded at moored stations. The statistics of transformations of the types of internal tides during their propagation along the section of the route from the slope to the shelf is given.

Полусуточные внутренние приливы на северо-западном шельфе Австралии обладают амплитудами в несколько десятков метров [1], в результате чего они подвержены значительной нелинейной трансформации. Волны, генерируемые над склоновой областью распространяются в сторону берега и быстро рассеиваются в районе излома шельфа. Длинный внутренний прилив становится круче, образуя внутренние боры и пакеты коротких солитоноподобных внутренних волн. Мы проследили за многообразием трансформаций внутреннего прилива на основе детальных измерений, проведенных с помощью трех заякоренных станций, расположенных в линию на участке шельфа длиной 7.5 км (Рис. 1а). Станции были оснащены измерителями течений и проработали в течение 67 суток.

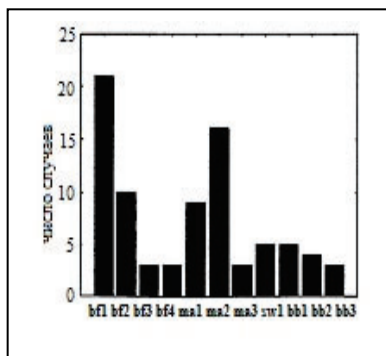
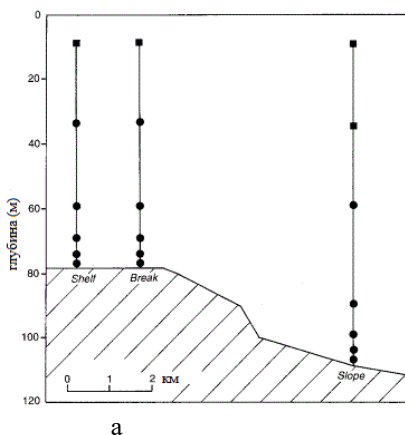


Рис. 1. Положение заякоренных станций и расположение измерителей течений (а); статистика волновых трансформаций в виде гистограммы (б).

Нами были проанализированы 130 внутренних приливов, проходящих последовательно точки “slope”, “break” и “shelf”. Всего было выявлено 5 типов форм, которые принимает прилив во время трансформации. Это бор на переднем склоне волны (тип 1, рис. 2), бор на задней поверхности волны (тип 2). Тип 3 представляет собой одновременное присутствие боров как на передней, так и на задней стороне волны, этот тип мы называем “прямоугольной” (square) волной. Все эти формы сигналов сильно нелинейны. Тип 4 представляет собой колебание малой амплитуды, приблизительно синусоидальное, хотя этот сигнал часто содержит многочисленные высокочастотные колебания. Тип 5 – синусоидальная волна большой амплитуды.

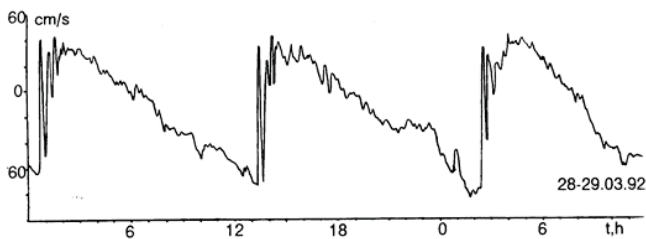


Рис. 2. Полусуточные приливные внутренние волны.

Их сильная трансформация приводит к образованию бора на переднем склоне и цуга внутренних солитонов. Это наиболее распространенный случай.

На рис. 3 показаны все волновые трансформации, которые имеет приливная внутренняя волна, принимающая образ одного из пяти типов волн при распространении через точки наблюдения. На рис.1 (б) показана статистика волновых трансформаций в виде гистограммы. Видно, что наиболее часто встречаются трансформации по типу bf1 – волна с передним бором проходит все точки наблюдения без изменения формы; sa2- волна типа 4 также проходит без изменения формы. bf2- волна с бором на переднем склоне, пройдя две точки на мелководье разрушается, превращаясь в синусоидальную волну малой амплитуды. Sa1- волна типа 4, проходя на мелководье, преобразуется в бор с крутым передним склоном. Но помимо всех упомянутых имеют место и трансформации где участвуют волны типа 3 –прямоугольные волн. На рис. 4 показаны волновые трансформации прямоугольных волн.

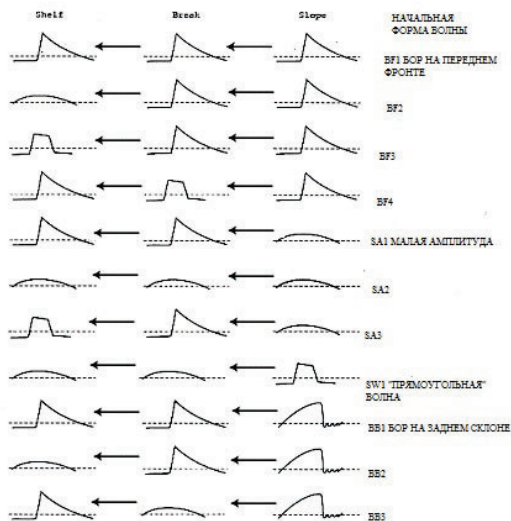


Рис. 3. Различные волновые трансформации, отмечаемые на заякоренных станциях при движении волны от материкового склона на шельф.

Хоть эти волны представляют собой промежуточную фазу нелинейной трансформации, относительно недолгую по времени, но все-таки эта фаза живет, по крайней мере, в течение нескольких часов. Выходя с материкового склона на шельф волна с бором на заднем склоне, укручивает передний склон, при этом сохраняется крутой задний склон. В

результате чего образуется прямоугольная волна. Оценки показывают, что дистанцию около 6.5 км прямоугольная волна

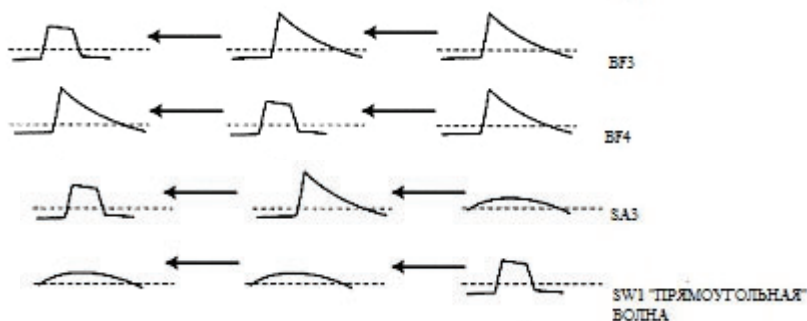


Рис. 4. Волновые трансформации прямоугольных внутренних приливов. проходит за 4 часа со скоростью около 0.45 м/с.

Объяснение феномена прямоугольной волны возможно искать в применении подхода разработанной модели [3]. Выходя на мелководье передний фронт попадает в зону где термоклин более прижат ко дну. Что усиливает коэффициент нелинейности, что и ведет к укрупнению переднего фронта. Интересно преобразования “square” волны в бор с крутым задним фронтом, что возможно при выходе на мелководье. Работа получила финансовую поддержку от Австралийского исследовательского Совета. На последнем этапе подготовки публикации работа выполнена при поддержке А.С. государственного задания РФ по теме № FMWE-2021-0010.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holloway, P.E. Internal hydraulic jumps and solitons at a shelf break region on the Australian North West shelf / P.E. Holloway // *J. Geophys. Res.* - 1987. - V.92(C5). - P. 5405-5416.
2. Холлоуей, П.Е. Многообразие трансформаций нелинейных внутренних приливных волн на северо-западном шельфе Австралии / П.Е. Холлоуей, А.Н. Серебряный Р // Доклады РАН. Науки о Земле. - 2023, (в печати).
3. Holloway, P. A generalized Korteweg-de Vries model of internal tide transformation in the coastal zone / P. Holloway, E. Pelinovsky, T. Talipova // *J. Geophys Res.* - 1999. - V. - 104. № с8. - P.18,333-18,350.

УДК 532.574

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ ПОДВОДНЫХ ТЕЧЕНИЙ ОЗЕРА БАЙКАЛ

Колигаев С.О.

*«Лаборатория прикладных информационных технологий «Инфрад»,
г.Дубна, ул.Энтузиастов, д.3«б»-198, dex@infrad.ru*

INVESTIGATION OF THE VERTICAL PROFILE OF THE UNDERWATER CURRENTS OF LAKE BAIKAL

Koligaev S.O.

*"Laboratory of Applied Information Technologies "Infrad",
Dubna, ul. Entuziastov, 3 "b", office 198.*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований вертикального профиля подводных течений в западной части озера Байкал.

The paper presents the results of experimental studies of the vertical profile of underwater currents in the western part of Lake Baikal.

Наиболее распространенным и удобным способом оценки вертикальных профилей подводных течений является использование доплеровских профилометров (ADCP).

Однако высокая степень чистоты и прозрачности Байкальской воды, в данном случае, отрицательно сказывается на эффективности способа, поскольку обуславливает низкий уровень отражательной способности водных масс и соответственно низкий уровень полезного сигнала.

В связи с этим пришлось воспользоваться прямым акустическим методом оценок компонент скорости потока.

Разработанный прибор использует времяпролетный акустический метод оценки компонент скорости потока и определяет направление и модуль вектора течения воды в точке своего расположения. На рис. 1а представлено схематическое изображение измерительной базы прибора с указанием используемых акустических трасс, а на рис.1б и 1в представлены его фотографии на льду перед опусканием и непосредственно в воде.

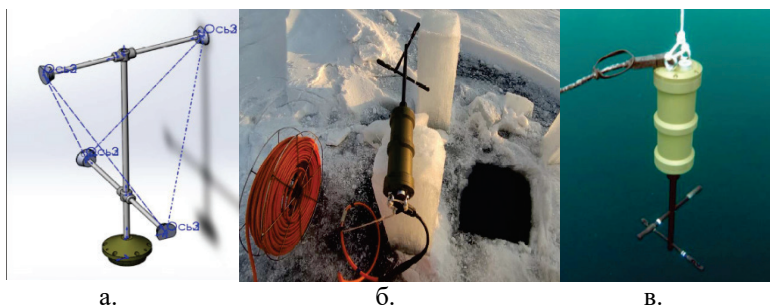


Рис.1 Конструкция прибора.

Встроенная система контроля ориентации обеспечивает возможность постоянной оценки пространственного положения измерительной базы и соответственно измерительных трасс, формирующих компоненты вектора скорости течения.

На рис. 2 представлена динамика оценок модуля и вертикальной компоненты скорости течения в процессе вращения прибора на глубине 40м, показывающая устойчивую работу измерителя независимо от ориентации прибора.

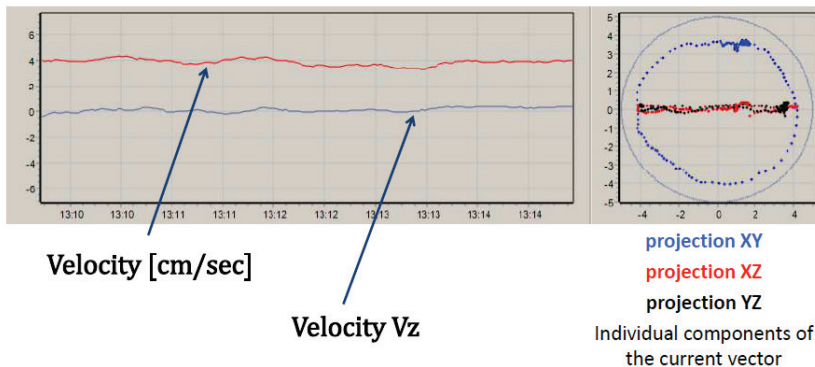


Рис.2 Оценка компонент вектора скорости течения при вращении.

На рис. 3 представлен процесс и собственно результат получения вертикального приповерхностного профиля течений в исследуемом районе озера Байкал в марте 2021 года. Желтой линией показано изменение глубины погружения измерителя скорости течений, осуществлявшегося ступенчато с дискретностью $\Delta h=10\text{м}$ от поверхности до глубины $h_{\text{max}}=130\text{м}$.

Красной линией показано изменение модуля вектора скорости течения, а синей линией его вертикальной компоненты.

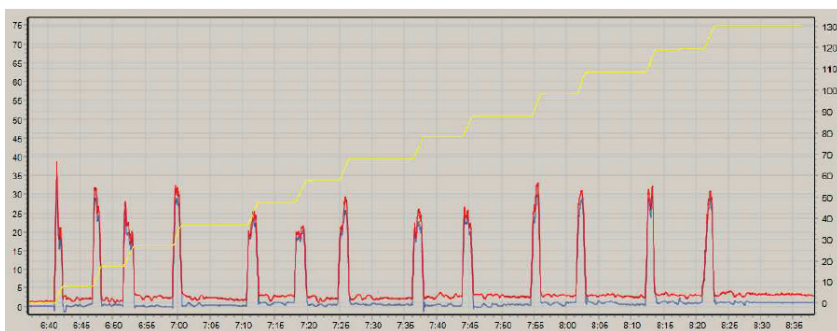


Рис. 3. Процесс погружения с шагом 10м.

На рис. 4 представлены детализированные фрагменты данного процесса на интервале глубин погружения от 10-ти до 30-ти метров (интервалы времени 6.47-6.48 и 6.51-6.53) с оценками компонент вектора скорости потока.

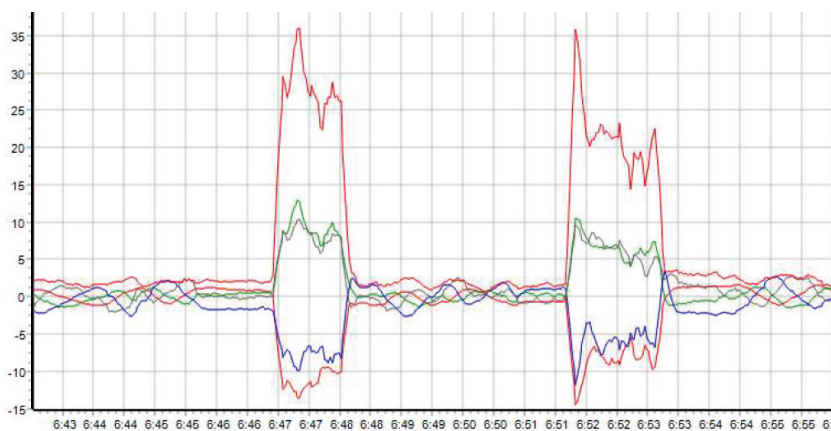


Рис. 4. Фрагмент процесса погружения.

На рис. 5 представлены результаты измерений модуля скорости течений и ее вертикальной компоненты. Среднее значение скорости течения составляет величину порядка $V=2.8\text{см/с}$. При этом вертикальная компонента скорости течения составила величину порядка 2 мм/с .

Результаты измерений показывают возможность достаточно точной оценки вертикального распределения скорости течений в озере Байкал прямыми акустическими методами

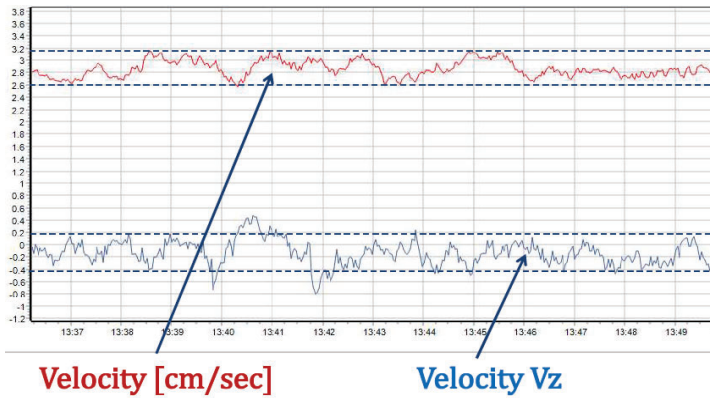


Рис.5. Оценка модуля вектора скорости течения и его вертикальной компоненты на глубине 40м.

На рис. 6 представлены оценки модуля вектора скорости течения в процессе погружения измерителя в марте 2022 года до глубины $H=1200$ метров дискретно с шагом $\Delta h=100$ метров.

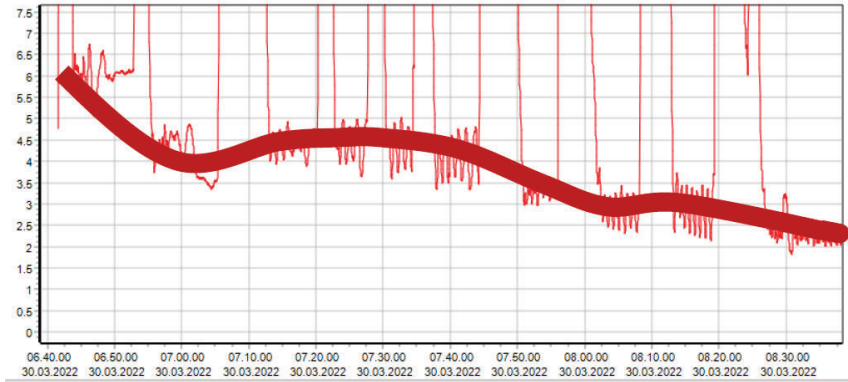


Рис.6. Вертикальный профиль скорости течений.

Скорость подводного течения изменялась от $V_0=6$ см/с у поверхности до $V_h=2$ см/с на глубине $h=1200$ метров.

Следует отметить, что данные параметры подводных течений в этом месте характерны именно зимнему периоду и периоду ранней весны при наличии ледового покрова.

УДК 551.463.5

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЯРКОСТИ МОРЯ С ПОМОЩЬЮ МАКЕТА ПАЛУБНОГО СПЕКТРОРАДИОМЕТРА

Павлова М.А.^{1,2}, Глуховец Д.И.^{1,2}, Дерягин Д.Н.^{1,2},
Круглинский И.А.³

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01,
pavlova.ma@phystech.edu*

² *Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), Институтский переулок,
д.9, 141701, г. Долгопрудный, Московская область, 8(495)408-
45-54*

³ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
площадь Академика Зуева, 1, 634055, г. Томск,
8(382)249-27-38*

MEASURING REMOTE SENSING REFLECTANCE USING A DECK SPECTRORADIOMETER PROTOTYPE

Pavlova M.A.^{1,2}, Glukhovets D.I.^{1,2}, Deryagin D.N.^{1,2},
Kruglinsky I.A.³

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of
Sciences, Nakhimovsky ave., 36, 117997, Moscow,
8(499)124-13-01*

² *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research
University), Institutsky Lane, 9, 141701, Dolgoprudny, 8(495)408-
45-54*

³ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Academician
Zuev Square, 1, 634055, Tomsk, 8(382)249-27-38*

В работе представлены первые результаты натуральных испытаний макета палубного спектрорадиометра, а также сравнение данных о

коэффициенте яркости моря, полученных новым прибором с эталонными данными плавающего спектрорадиометра ИО РАН.

The paper presents the first results of field tests of the deck spectroradiometer prototype, as well as a comparison of data on the remote sensing reflectance obtained by the new device and the reference data of the SIO RAS floating spectroradiometer.

Макет палубного спектрорадиометра (ПСР) разработан для определения коэффициента яркости моря (R_{rs}). Он состоит из малогабаритного спектрометра Ocean Insight Flame и световода, установленного под углом 30° к надиру (рис. 1). ПСР использовался в 88-м и 89-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК-88, АМК-89) в Гренландское, Норвежское, Баренцево и Карское моря в августе-октябре 2022 года. С его помощью проводились измерения коэффициента яркости моря как на станциях, так и на ходу судна. Полученные данные сравнивались с результатами измерений, определенных с использованием плавающего спектрорадиометра ПРО-1 [1], являющегося эталонным ввиду абсолютной радиометрической калибровки каналов яркости и облученности. Спектры, определенные с помощью этих двух приборов, в большинстве случаев хорошо согласуются между собой ($RMSE < 0,6 * 10^{-3} \text{ cp}^{-1}$).

Методика измерения аналогична используемой в МГИ РАН [2] и, следовательно, требует применения вспомогательных элементов: наполненной водой кюветы с поглощающими стенками и диффузно отражающего экрана. Яркости моря, небосвода, а также белого (АМК-88, 1-ый этап АМК-89) или серого (2-ой этап АМК-89) экранов измеряются в три серии по 10 спектров. Использование серого экрана позволяет записывать все спектры при одном времени накопления, что повышает точность измерений. В ходе обработки данных рассчитываются 10 спектров коэффициентов яркости моря, далее используется их медианное значение (рис. 2, слева).

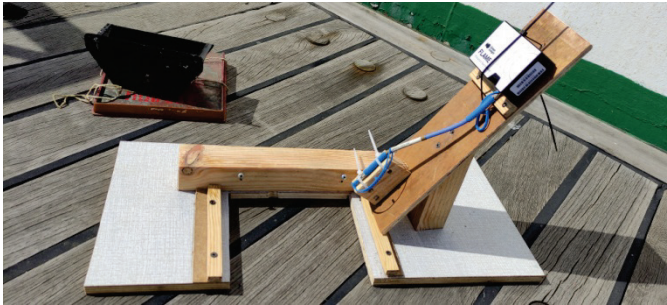


Рис. 1. Палубный спектрорадиометр

Спектр измеренного коэффициента яркости моря отличается от ожидаемого на некоторую величину «подставки» (рис. 2, справа), которая устраняется в ходе последовательного решения обратной и прямой задач. Алгоритм вычисления «подставки» заключается в расчете биооптических параметров [3] (концентрации хлорофилла-*a*, показателя поглощения желтым веществом и показателя рассеяния назад частицами); восстановлении по ним модельного спектра; определении разницы и ее вычитания из измеренного спектра коэффициента яркости моря.

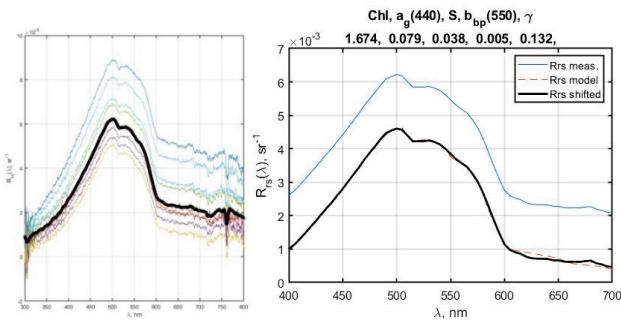


Рис. 2. Спектры коэффициента яркости моря: измеренные и медианный (слева); медианный, модельный и скорректированный (справа) для станции 7430 в Карских воротах, 8 сентября 2022 г.

При сопоставлении спектров коэффициентов яркости моря, полученных с помощью двух спектрорадиометров, были рассчитаны среднеквадратические ошибки. Среди пар измерений «палубный – плавающий», относящихся к применению белого и серого экранов, максимальные значения составили: $RMSE_{\max} = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ sr}^{-1}$ и

$RMSE_{\max} = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ ср}^{-1}$ соответственно. В качестве примера приведено сопоставление спектров коэффициентов яркости для станции в Баренцевом море (рис. 3). Несмотря на то, что эксперименты по сравнению влияния использования различных экранов на точность измерений не проводились в одинаковых условиях, полученный результат соответствует ожиданиям о преимуществах использования серого экрана.

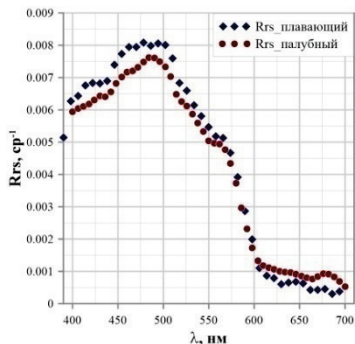


Рис. 3. Спектры коэффициента яркости моря, измеренные двумя спектро радиометрами на станции 7466 в Баренцевом море, 17 сентября 2022 г.

Как показало сравнение с данными, полученными с помощью эталонного плавающего спектро радиометра, макет палубного спектро радиометра позволяет измерять коэффициент яркости моря с достаточной точностью. Основным преимуществом использования ПСР над ПРО-1 является возможность работы на ходу судна, что значительно увеличивает объем полученных данных. Это особенно важно при восстановлении пространственных и временных распределений биооптических характеристик вод.

Данные судовых измерений получены в рамках госзадания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0001. Обработка данных проводилась по проектам РФФИ № 21-77-10059 и Минобрнауки № 075-15-2021-934.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектро радиометр и его метрология // Океанология. 2000. Т. 40. № 1. С. 148-155.

2. Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Корчёмкина Е.Н., Мартынов О.В. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // Морской гидрофизический журнал. 2015. Т. 186. № 6. С. 17–33.
3. 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.

УДК 551.465.41

АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВЯЙСЯЛЯ-БРЕНТА В ЦИКЛОНАХ И АНТИЦИКЛОНАХ ЛОФОТЕНСКОЙ КОТЛОВИНЫ

Новоселова Е.В.¹, Белоненко Т.В.¹, Жмур В.В.^{2,3}

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7–9, +7 (812) 914-64-43, spbu@spbu.ru*

²*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, +7 (499) 124-59-83, office@ocean.ru*

³*Московский физико-технический институт, Россия, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9, +7 (495) 408-42-54, info@mipt.ru*

ANALYSIS OF THE VÄISÄLÄ-BRENT FREQUENCY DISTRIBUTION IN CYCLONES AND ANTICYCLONES OF THE LOFOTEN BASIN

Novoselova E.V., Belonenko T.V., Zhmur V.V.

¹*St. Petersburg State University, Saint Petersburg*

²*P. P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

³*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny*

В данной работе рассматривается воздействие мезомасштабных вихрей океана на перестройку частоты Вяйсяля-Брента, которая возрастает при усилении стратификации морской воды и уменьшается в слабостратифицированных водах.

In this paper, we consider the effect of mesoscale ocean eddies on the Väisälä-Brent frequency tuning, which increases with seawater stratification and decreases in weakly stratified waters.

ЛК представляет собой понижение в рельефе дна Норвежского моря с максимальной глубиной 3250 м. Она является одним из динамически активных районов Мирового океана и характеризуется повышенной вихревой активностью.

Для исследования изменений частоты Вьяйсяля-Брента (ВБ) в циклонах и антициклонах выбраны два вихря в Лофотенской котловине (ЛК). В качестве антициклонического был выбран квазипостоянный Лофотенский вихрь, расположенный в центре ЛК. Изменения частоты ВБ в вихрях анализировались относительно так называемой фоновой частоты ВБ N_0 или частоты ВБ в покое. Отметим, что выбор подходящего профиля не является простой задачей, поскольку котловина «усеяна» мезомасштабными вихрями. Вихри перераспределяют тепло и соль по акватории котловины, тем самым оказывая значительное влияние в том числе и на изменения частоты ВБ. Будучи транзитной зоной для теплых и соленых атлантических водных масс на их пути в Северный Ледовитый океан, ЛК играет важную роль в поддержании глобальной Меридиональной термохалинной циркуляции в области, где атлантические водные массы отдают тепло в атмосферу, перемешиваются с окружающими водами и претерпевают трансформацию, необходимую для образования глубинных вод. При этом обнаружено, что в ЛК могут существовать по крайней мере два механизма вихреобразования: это либо отрыв меандров от струи Норвежского течения, либо генерация вихрей на склонах котловины, где скорость течения невелика.

Мы использовали данные глобального океанического реанализа GLORYS12V1 за 10 июня 2010 г., доступные на сайте CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service). Данные о температуре и солености на 50 горизонтах имеют пространственное разрешение $1/12^\circ$, что составляет приблизительно 4×8 км для высоких широт.

На рисунке 1 представлены вертикальные разрезы частоты ВБ в циклоническом и антициклоническом вихрях. В циклоне максимальные изменения частоты ВБ соответствуют слою от 100 до 400 м. Две области сгущения изопикн в верхнем слое и на глубине 400–600 м соответствуют двум областям повышенных значений N^2 . Ядро антициклонического вихря хорошо выделяется на разрезе частоты ВБ, при этом в слоях над и под ядром, где наблюдается сгущение изопикн, значения частоты ВБ максимальны, а в самом ядре – практически нулевые.

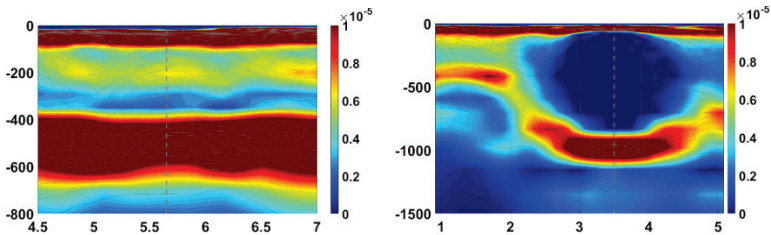


Рис. 1. Квадрат частоты ВБ в циклоническом (слева) и антициклоническом (справа) вихрях.

Профили частоты ВБ в вихрях и соответствующие аномалии относительно фоновой частоты представлены на рисунке 2. Видно, что экстремумы достигаются в верхнем 50-метровом слое. В ядре циклона в слое 100–400 м отмечается максимум аномалий частоты ВБ с положительными значениями аномалий. Это связано с прогибом изопокн к поверхности. Другой максимум расположен на горизонте 500 м, где происходит сгущение изопокн. В ядре циклона (слой 200–300 м) аномалии частоты ВБ относительно фоновой положительны. Однако следует отметить, что в ядре циклона наблюдаются как положительные, так и отрицательные аномалии, но преобладают положительные.

В ядре антициклона вертикальные изменения частоты ВБ практически отсутствуют, так как ядро по плотности практически однородно (см. рис. 1), а аномалии частоты ВБ относительно фоновой частоты отрицательны. Если рассматривать тонкие детали частоты ВБ в ядре антициклона, то следует отметить двухслойность ядра, состоящего из двух практически однородных по плотности слоев, в каждом из которых относительные колебания частоты ВБ весьма малы: $\left| \frac{N^2(x, y, z, t)}{N_0^2(z)} \right| < 0.01$. В

районе горизонта 350 м это неравенство нарушается: $\frac{N^2(x, y, z, t)}{N_0^2(z)} \approx 0.05$, что

указывает на слабый скачок плотности на этом горизонте. Однако среднее значение относительных колебаний частоты ВБ остаётся в том же диапазоне: $\left| \frac{N^2(x, y, z, t)}{N_0^2(z)} \right| < 0.01$.

Таким образом, в ядре циклона частота ВБ в среднем увеличивается, а в ядре антициклона уменьшается практически до полной однородности по плотности.

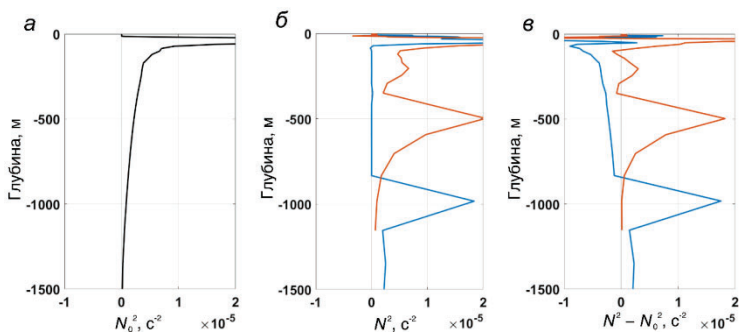


Рис. 2. Профили квадрата частоты ВБ, c^{-2} : (а) фоновая $N_0^2(z)$; (б) $N^2(z)$ в центре вихря; (в) аномалии $N_0^2(z) - N^2(z)$ в центре вихря. Оранжевая и синяя линии относятся к циклону и антициклону соответственно

В работе исследуется роль частоты ВБ в мезомасштабных вихрях. В качестве примера по данным океанического реанализа GLORYS12V1 рассматриваются два вихря Лофотенской котловины Норвежского моря: циклон и антициклон. Для этих вихрей построены вертикальные разрезы и вертикальные профили частоты ВБ. Было показано, что изопикны в циклонах и антициклонах деформируются в среднем в противоположных направлениях. Циклонические вихри сближают изопикны, втягивая ближние внешние изопикны внутрь вихревого ядра, в то же время антициклонические вихри раздвигают изопикны друг от друга. Последнее приводит к увеличению частоты ВБ в вихревом ядре циклона и соответствующему ее уменьшению в антициклоне. Показано, что аномалии частоты ВБ относительно фоновой частоты положительны в ядре циклона и отрицательны в ядре антициклона.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22-27-00004.

УДК 551.465.53

СПЕКТРАЛЬНАЯ СТРУКТУРА КОЛЕБАНИЙ ТЕЧЕНИЙ В КАРСКОМ МОРЕ К ЗАПАДУ ОТ ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ

Амбросимов А.К., Мельников В.А.

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8 (499) 124-63-83,
ambrosimov@ocean.ru*

SPECTRAL STRUCTURE OF CURRENT OSCILLATIONS IN THE KARA SEA WEST OF THE YAMAL PENINSULA

Ambrosimov A.K., Melnikov V.A.

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of
Sciences, 36, Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

В работе рассматриваются спектральные свойства течений во внутригодовом диапазоне частот в Карском море около полуострова Ямал по измерениям в 2021-2022 гг.

The paper considers the spectral properties of currents in the intra-annual frequency range in the Kara Sea near the Yamal Peninsula based on measurements in 2021-2022.

В юго-западной части Карского моря у северных берегов п-ва Ямал происходит схождение нескольких потоков вод различного происхождения, [1]. В результате смешения водных масс возникают многомасштабные гидрологические возмущения. Этот процесс существенно усложняет изучаемые поля, особенно на акватории к западу от п-ва Ямал, [2]. В связи с этим, были проведены наблюдения на двух притопленных буйковых станциях (ПБС), которые были разнесены на 100 км в зональном направлении, от п-ва Ямал к о. Новая Земля. На этих станциях (7440 и 7441) при помощи ADCP Sontek, синхронно, на глубинах 45 м, в течение 86 часов были проведены измерения температуры и скорости течений. Дискретность отсчётов составляла 10 сек., что позволило оценить высокочастотную часть спектра возмущений. Гидрологическая структура вод на станциях показана на рис.1. Хорошо заметны различия в тонкой структуре профилей гидрологических параметров. Ещё более различались короткопериодные течения на этих станциях, (рис.2).

Спектральный состав также оказался различным. Колебания скорости течений, видимо, обусловлены сложным сочетанием приливов и турбулентным перемешиванием. Флуктуации температуры амплитудой порядка 3°C на горизонте 45м на ст.7440 указывает на возможное влияние нижней границы верхнего деятельного слоя моря с однородной холодной массой арктических вод (рис.3.a). На ПБС-7440 измеритель находился в толще арктической воды в течение всего времени наблюдений. Однако, привлекает внимание цуг ярких 6-часовых автоколебаний, начиная с 13 сентября, (рис.3.б).

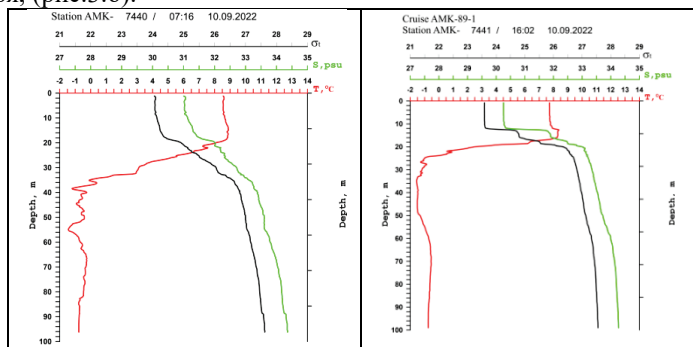


Рис.1. Вертикальная гидрологическая структура вод на ст.7440 и ст.7441.

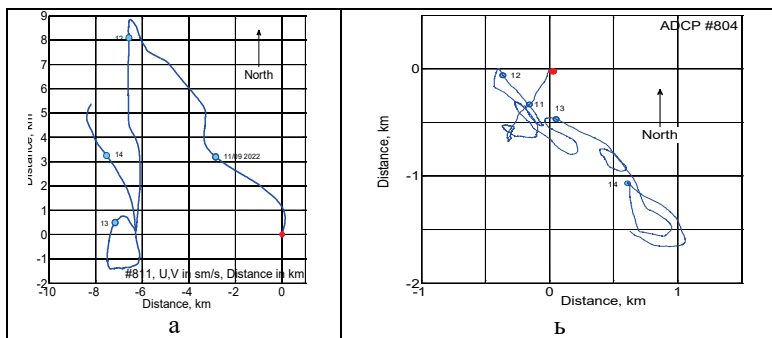


Рис.2. Прогрессивно-векторные диаграммы течений: а) ст.7440; б) ст.7441 (Карское море; 71.957N, 67.433E и 72.367N, 65.433E; время измерений 86 ч; дискретность 10 с; 30960 отсчётов скорости течений, температуры, давления столба воды над прибором. Измеритель ADCP Sontek №811; горизонты измерений 45 м, глубина моря - 100 м).

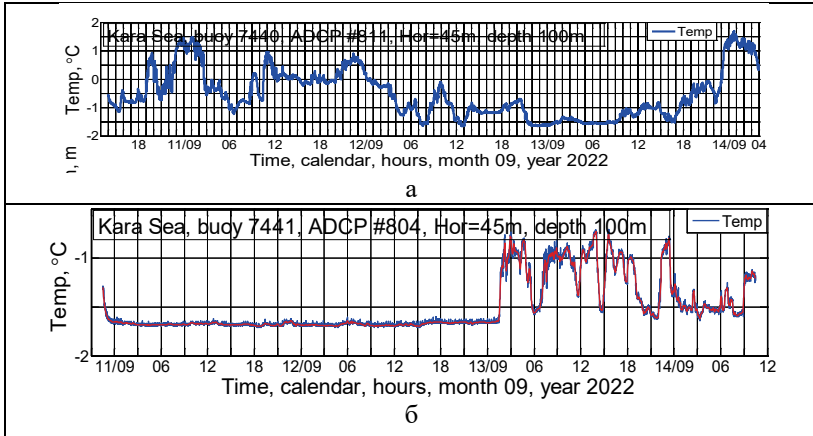


Рис.3. Динамика температуры воды: а) на ст.7440; б) на ст 7441.

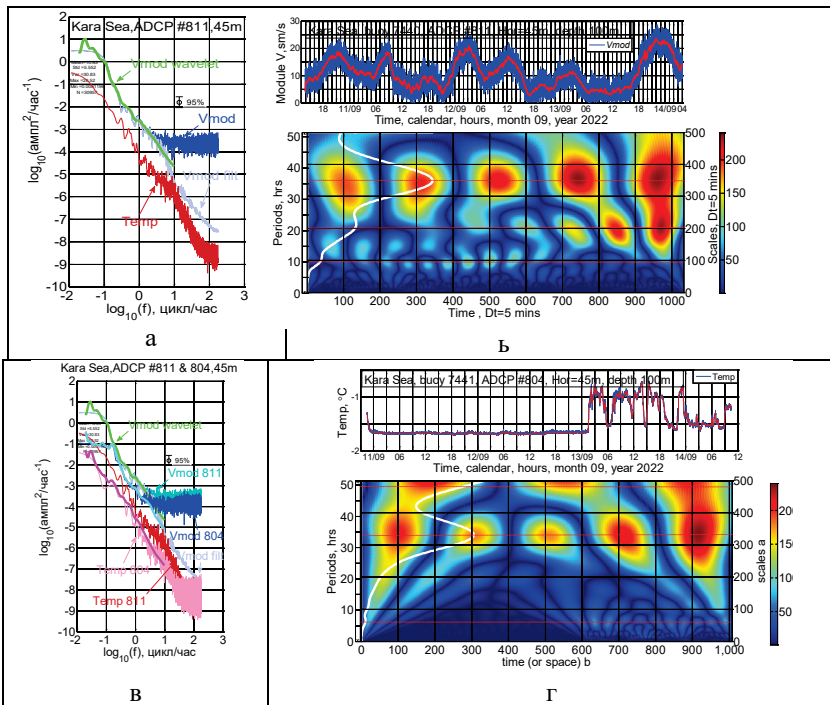


Рис.4, а,в. Спектральные плотности Фурье: рисунок слева – модуль вектора скорости течений $V_{mod}=0.5\rho(U^2+V^2)$, $U(\text{east})$ и $V(\text{north})$; б,г. - ход

по времени модуля скорости течений и температуры - верхняя панель. Нижняя панель: вейвлет-плотности модуля скорости течений и темп. в диапазоне периодов 0-50 часов. Ст.7440- **а,б**; ст 7441- **в,г**.

По данным 10-ти секундных отсчетов рядов (N=30960) были рассчитаны плотности спектральной энергии возмущений течений и температуры, а также вейвлет-диаграммы, которые представлены на **рис.4**. Спектральный анализ флуктуаций температуры и течений на станциях показывает (**рис.4, а, в**), что величина всплесков энергии на ст.7440 для обоих параметров была выше, чем на ст.7441. Из предварительного анализа вейвлет-диаграмм **рис.4. б, г** следует, что прослеживаются аperiodические возмущения энергии масштабами от 30 до 40 час на ст.7440 и 30–35 час на ст.7441. Периодичность возмущений во времени составляе в обоих случаях около 16-17 часов.

Таким образом, измерения на станциях в юго-западной части Карского моря показали, что интенсивная динамика вод наблюдается в более мористой части района: на ст.7441, где происходит взаимодействие потоков вод. Результирующий перенос вод на станциях за 86 часов наблюдений составил: на ст.7440 – около 10 км в СЗ направлении и на ст.7441 – 1.3 км в ЮВ направлении.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № 0128-2021-0002, а также при выполнении темы 4.6.11 Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова Росгидромета.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Zatsepin, A. G., et al. Circulation in the southwestern part of the Kara Sea in September 2007// Oceanology.- V.50. Part 5.-2010. - P. 643-656.
2. Амбросимов, А.К. Динамика сверххолодного промежуточного слоя Карского моря в летние сезоны 2019-2021 гг.// Междунар. конф. Инженерная экология. НТО радиотехника, электроника и связь им.А.С.Попова. 2022. Вып.ХI. С.96-100.
3. Архипов, В.В., Мельников, В.А., Цвечинский, А.С. Особенности разномасштабных гидрофизических процессов в Карском море// Одиннадцатая открытая Всероссийская конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования я Земли из космоса». Москва: ИКИ РАН.- 2013. P. 204.

РЕГИОНАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СПУТНИКОВОЙ СОЛЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА ДЛЯ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Криницкий М.А.^{1,2}, Савин А.С.², Осадчиев А.А.^{1,2}

¹ *Институт океанологии им П.П. Ширишова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект, 36, 8(499)124-61-49
office@ocean.ru*

² *Московский физико-технический институт,
117303, Москва, Керченская улица, 1А, корп. 1, 8(495)408-45-54,
info@mipt.ru*

REGIONAL ALGORITHM OF SATELLITE-DERIVED SEA SURFACE SALINITY FOR THE RUSSIAN ARCTIC SEAS

Krinitkiy M.A.^{1,2}, Savin A.S.², Osadchiev A.A.^{1,2}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 36, Nakhimovskii Prosp., Moscow,
117997*

² *Moscow Institute of Physics and Technology, 1A, Kerchenskaya St., Moscow,
117303*

В работе представлен алгоритм восстановления солёности поверхностного слоя океана для морей российской Арктики по спутниковым данным SMAP на основе методов машинного обучения. Верификация алгоритма производилась по данным многочисленных натурных измерений солёности в морях российской Арктики с 2015 по 2022 год. Разработанный региональный алгоритм обладает гораздо большей точностью по сравнению со стандартным алгоритмом SMAP.

This study presents an algorithm for sea surface salinity retrieval in the Russian Arctic seas from SMAP satellite data using machine learning approaches. Verification of the algorithm was carried out using numerous in situ salinity measurements in the Russian Arctic seas obtained from 2015 to 2022. The developed regional algorithm has much better accuracy as compared to the standard SMAP algorithm.

Солёность морской воды является одной из важнейших характеристик Мирового океана. До недавнего времени основным методом получения информации о поле солёности были натурные измерения,

производимые с помощью гидрологических зондов. В наши дни активно развиваются спутниковые методы измерения поверхностной солености океана (ПСО). В настоящее время для этих целей используются данные, получаемые спутниками Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS, с 2009 года), Aquarius (с 2011 года) и Soil Moisture Active Passive (SMAP, с 2015 года). Установленные на борту этих спутников пассивные микроволновые радиометры, работающие в L-диапазоне (1.4 ГГц), позволяют восстанавливать значения ПСО по данным спутниковых измерений микроволнового излучения, исходящего от поверхности моря.

Стандартные численные алгоритмы, используемые для восстановления значений ПСО по данным микроволнового излучения, разработаны и верифицированы (с точностью до 0.1 епс) для наиболее типичных диапазонов температуры и солености Мирового океана. При этом, стандартные алгоритмы имеют гораздо более низкую точность (более 1 епс) при восстановлении солености в Северном Ледовитом океане, характеризующемся низкими температурами (менее 5-10 °С) [1]. Еще большие ошибки (более 2-3 епс) стандартных алгоритмов наблюдаются в шельфовых районах Северного Ледовитого океана, находящихся под воздействием значительного речного стока. В этих акваториях негативное влияние низких температур на точность алгоритмов усиливается ошибками из-за низкой солености (менее 25 епс) поверхности моря.

Целью настоящей работы является разработка регионального алгоритма восстановления спутниковой солености для данных SMAP для морей российской Арктики на основе методов машинного обучения. Обучение и верификация алгоритмов проводится по данным натурных измерений солености, полученных в многочисленных экспедициях с 2015 по 2022 год в Баренцевом, Карском, Лаптевых и Восточно-Сибирском морях. В работе применяются и анализируются такие модели машинного обучения, как случайные леса (RF), метод опорных векторов (SVM), градиентный бустинг над решающими деревьями (GB), а также искусственная нейронная сеть (ANN). В качестве опорной модели используется многомерная линейная регрессия (LR). Входными переменными для описанных моделей машинного обучения берутся данные ПСО, полученные стандартным алгоритмом SMAP, значения радиояркостной температуры, измеренные спутниковыми микроволновыми радиометрами, концентрация морского льда, скорость и направление приповерхностного ветра, а также другие характеристики, регистрируемые спутниковыми приборами или поставляемые синхронно спутниковым измерениям. Результаты работы алгоритмов машинного обучения сравниваются с натурными данными по принципу временной и пространственной близости измерений. Вследствие существенно

неравномерного распределения измеренных значений солености в интервале от ~ 0.5 до ~ 35 епс в массиве натуральных наблюдений, разрабатываемые алгоритмы отдельно применяются к разным классам значений солености ($S < 12$, $12 < S < 24$, $24 < S < 29$, $29 < S$). Распределение ПСО по натурным данным представлено на рис.1.

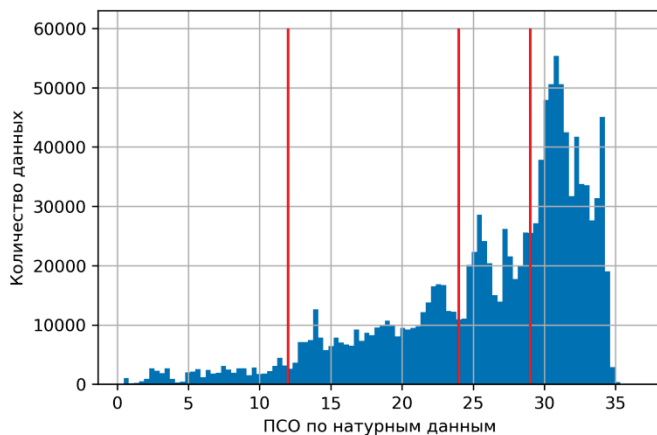


Рис. 1. Распределение солености поверхностного слоя океана по данным натуральных измерений.

В результате работы были выявлены наиболее подходящие модели машинного обучения для восстановления значения ПСО в зависимости от класса солености. Была исследована зависимость целевой переменной от входных признаков; оценено влияние разницы по времени и по пространству между спутниковыми и натурными измерениями на точность разработанных алгоритмов. Кроме этого, было исследовано влияние граничных значений целевой переменной при использовании весовых коэффициентов модели и других характеристик, используемых данных на качество восстановления ПСО.

Использование алгоритмов машинного обучения позволило существенно улучшить точность определения ПСО в морях российской Арктики по сравнению со стандартными продуктами SMAP. Предлагаемый подход можно использовать для улучшения стандартного продукта SMAP и создания региональных алгоритмов для других районов Мирового океана находящихся под сильным влиянием речного стока [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Supply A. et al. New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean //Remote Sensing of Environment. – 2020. – Т. 249. – С. 112027.
2. Jang E. et al. Improvement of SMAP sea surface salinity in river-dominated oceans using machine learning approaches //GIScience & Remote Sensing. – 2021. – Т. 58. – №. 1. – С. 138-160.

УДК 551.465

УСВОЕНИЕ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ПО ТЕМПЕРАТУРЕ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ И СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОЛЯ В МОДЕЛИ INMOM ДЛЯ АКВАТОРИИ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ

Панасенкова И.И.^{1,2,3}, Фомин В.В.^{1,2,4}, Дианский Н.А.^{1,4,5}

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, 8(499) 246-72-88, adm@oceanography.ru

² Гидрометцентр России, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1, 8 (499) 252-34-48, hmc@mecom.ru

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01, resty@mail.ru

⁴ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 8, 8(495) 984-81-20, director@mail.inm.ras.ru

⁵ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, ул. Колмогорова, 1, 8 (495) 939-10-00, info@rector.msu.ru

ASSIMILATION OF SATELLITE MEASUREMENTS OF THE SEA SURFACE TEMPERATURE AND ICE CONCENTRATION IN THE INMOM FOR THE WESTERN ARCTIC SEAS OF RUSSIA

Panasenkova I.I.^{1,2,3}, Fomin V.V.^{1,2,4}, Diansky N.A.^{1,4,5}

¹ *N. N. Zubov's State Oceanographic Institute,
6, Kropotkinsky lane, Moscow, 119034*

² *Hydrometcenter of Russia,
13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376*

³ *Shirshov Institute of Oceanology of RAS,
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

⁴ *Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS,
8, Gubkina Str., Moscow, 119333*

⁵ *Moscow State University M. V. Lomonosov,
1, Kolmogorov Str., Moscow, 119991*

В работе представлена российская σ -модель морской циркуляции INMOM с пространственным разрешением 2.5 – 2.7 км в версии для Западно-Арктических морей России (Баренцева, Карского, Белого и Печорского морей) с реализованным алгоритмом усвоения данных наблюдений на основе метода ансамблевого фильтра Калмана с использованием программного комплекса DART, который позволяет эффективно усваивать данные спутниковых наблюдений за температурой поверхности моря и сплоченностью льда и, таким образом, корректировать начальное состояние гидрофизических полей, используемое при расчетах. Это, в свою очередь, приводит к повышению качества модельных прогнозов.

Paper presents Russian σ -model of marine circulation INMOM with a spatial resolution of 2.5 – 2.7 km in the version for the Western Arctic seas of Russia (Barents, Kara, White and Pechora seas) with an implemented assimilation algorithm based on the Kalman ensemble filter method using the DART complex, which makes it possible to effectively assimilate satellite observations of sea surface temperature and ice concentration and, thus, correct the initial state of hydrophysical fields used in forecasts. This, in turn, leads to an increase of model forecasts quality.

Модель INMOM для акватории Западно-Арктических морей России является основой, реализованной в Государственном океанографическом институте им. Н. Н. Зубова (ФГБУ «ГОИН»), системы морских ретроспективных расчетов и прогнозов (СМРП) гидрометеорологических и ледовых характеристик [1], которая функционирует в оперативном режиме на кластере ФГБУ «ГОИН».

В работе проведены расчеты гидротермодинамических и ледовых характеристик с использованием атмосферного воздействия COSMO-Ru (в

версии ENA с пространственным разрешением 6.6 км) за период с 01.08.2021 г. по 01.09.2021 г. по трем различным сценариям экспериментов:

- анализ и прогноз (на 24 часа) с совместным усвоением спутниковых данных наблюдений температуры поверхности моря (ТПМ) и сплочённости ледяного покрова с помощью системы усвоения DART (Data Assimilation Research Testbed, (<https://dart.ucar.edu/>)) методом ансамблевого фильтра Калмана EnKF;
- прогностический расчет без усвоения;
- прогностический расчет с «квазиусвоением» по методу «наджинга» (осуществлялась притяжка модельной ТПМ к спутниковой температуре с коэффициентом, интерпретируемым как масштаб релаксации $\sim 1/(3 \text{ мес})$ по отношению к 10-метровому приповерхностному слою).

В качестве усваиваемых данных использовались данные спутниковой ТПМ с разрешением 0.05° по широте и долготе (SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001), предоставляемые европейской службой CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) [marine.copernicus.eu], и данные сплоченности ледяного покрова AMSRE/AMSR2 с разрешением 6.25 км (https://seaice.uni-bremen.de/data/amr2/asi_daygrid_swath/n6250/), предоставляемые университетом Бремена. Усвоение спутниковых данных проводилось раз в сутки (каждые 00:00 ч.), усваивалось только 25% спутниковой информации. Полученное поле анализа использовалось в качестве начальных данных при расчете прогноза по модели INMOM на 24 ч.

В качестве элементов ансамбля (набора модельных состояний, необходимого для процедуры усвоения по методу EnKF в DART) использовались состояния модели INMOM на дату прогноза, рассчитанные в ретроспективном режиме за период с 1995 г. по 2020 г. Количество элементов ансамбля полагалось равным 25.

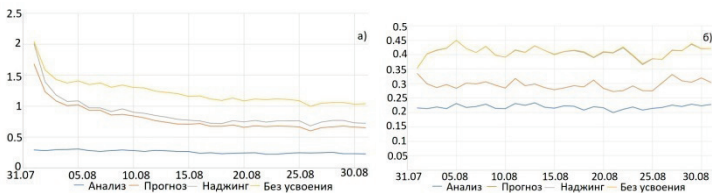


Рис.1 – Временной ход RMSE ТПМ (°C) (а) и сплоченности льда (б) по расчетам с усвоением (анализ и прогноз), без усвоения и с усвоением по методу «наджинга».

На рис. 1 представлена временная изменчивость среднеквадратичного отклонения (RMSE от спутниковых данных) значений ТПМ (а) и сплоченности ледяного покрова (б) по расчетам без усвоения, с усвоением методом «наджинга», по данным прогноза (рассчитанным до усвоения), по данным анализа (после усвоения) за период расчета. В результате усвоения ТПМ ошибка в поле прогноза уменьшается, RMSE в среднем снижается на 0.2-0.3°C. Кроме того, в расчетах с усвоением по сравнению с расчетом без усвоения ошибка прогнозов ТПМ уменьшается на ~ 70%.

В первые дни после начала усвоения значения RMSE сплоченности льда уменьшаются и достигают значений ~0.23. С течением времени прослеживается небольшой рост RMSE, который, вероятно, связан с недостаточным разбросом данных в ансамбле модельных состояний. В расчетах без усвоения и с использованием «наджинга» RMSE достигает практически 0.45.

Таким образом, RMSE между спутниковыми данными наблюдений и результатами расчетов для ТПМ и сплоченности ледового поля уменьшается на 60 – 80%, что позволяет говорить об эффективности и корректности работы алгоритма усвоения в INMOM. При этом, качество усваиваемых данных также влияет на точность воспроизведения гидрологических и ледовых характеристик. В целом, в результате усвоения поля ТПМ и сплоченности льда корректируются в соответствии с используемыми данными спутниковых наблюдений. Наименьшая ошибка в ТПМ наблюдается в открытой части моря, а максимальная – в прибрежных мелководных областях, а также в Карском море, включая Обскую губу и Енисейский залив, где качество усваиваемых данных низкое и отклонение ТПМ поля анализа от спутниковых данных может превышать 1°C. Алгоритм усвоения сплоченности льда по спутниковым данным позволяет существенным образом повысить точность расчетов ледовых характеристик в прикромочной области и в областях с интенсивным таянием льда.

Работа выполнена в рамках плана НИОКТР тема № АААА-А20-120021890121-5 (Разработка и совершенствование 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.jscs.ru/>] и на суперкомпьютере XC40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета».

ЛИТЕРАТУРА

1. Дианский Н.А. Система оперативных и ретроспективных расчётов гидрометеорологических параметров и морского льда для западных морей российской Арктики / Н. А. Дианский, И. И. Панасенкова, В. В. Фомин, А. В. Гусев, И. М. Кабатченко // Морские информационно-управляющие системы. –2020. –Т. 17. № 1. –С. 44-51.

УДК 551.515

МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В ДАННЫХ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ НАД ОКЕАНОМ

Кошкина В.С.^{1,2}, Гавриков А.В.²

¹ *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), 117303, Москва, Керченская улица, 1А, корп. 1, +7 (495) 408-45-54, info@mipt.ru*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01, office@ocean.ru*

METHODS OF IDENTIFICATION COHERENT STRUCTURES IN NUMERICAL DATA OF THE ATMOSPHERE OVER THE OCEAN

Koshkina V.S.^{1,2}, Gavrikov A.V.²

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),*

1 "A" Kerchenskaya st., Moscow, 117303

² *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

В работе исследуется применимость широко используемых в турбулентной гидродинамике методов выделения когерентных структур к мезомасштабным и синоптическим движениям, что потенциально позволяет автоматически выделять мезомасштабные структуры. Был произведен расчет критериев на данных численного моделирования атмосферы над Северной Атлантикой, разработан

алгоритм вычисления статистик вихревых структур и получена функциональная зависимость порогового значения критерия от высоты.

In this paper we study the applicability of the Euler methods for identification of coherent structures, which are widely used in turbulent hydrodynamics, to mesoscale and synoptic motions. The criteria were calculated on the data of numerical modeling of the atmosphere over the North Atlantic. An algorithm for calculating the statistics of coherent structures was developed, and the functional dependence of criterion's threshold value on height was obtained.

В геофизических данных когерентные структуры (КС) в подавляющем большинстве случаев соответствуют вихревым образованиям. Вихри встречаются в природе повсеместно и играют важную роль во многих процессах. На синоптическом и мезомасштабах вихри участвуют в процессах переноса импульса, температуры и массы как в океане, так и в атмосфере. На малых масштабах вихревая динамика также имеет большое значение для понимания механизмов турбулентного взаимодействия, таких как: перемешивание, тепло-массообмен, химические реакции, генерация аэродинамического шума и других. Таким образом, вихри играют важнейшую роль в динамике океана и атмосферы на всех масштабах, а точность описания этой динамики зависит главным образом от объективности идентификации вихря. Настоящая работа посвящена наиболее обещающим методам выделения КС в пространственных полях, а именно в результатах численного моделирования.

На турбулентных масштабах задачей поиска объективного критерия для выделения когерентных структур активно занимаются последние 50 лет. Полученные подходы опираются на различные предпосылки, однако могут быть классифицированы в одну из двух основных категорий: эйлерову или лагранжеву. Эйлеров подход основан на топологическом анализе полей динамических переменных, а в подходе Лагранжа анализируются траектории отдельно взятых жидких частиц с помощью методов из теории динамических систем.

Трудность в объективной идентификации КС заключается в отсутствии общепринятого математического определения вихря и, в особенности, его внешней границы. Для атмосферных циклонов (движения синоптического масштаба) эта задача с удовлетворительной точностью решается путем определения границы циклона по его последней замкнутой изобаре. Но для широкого диапазона мезомасштабных движений эта проблема остается нерешенной. Таким образом, существует необходимость

в инвариантных и объективных критериях, максимально достоверно описывающих границу вихря.

В настоящей работе мы рассматриваем критерии эйлерова подхода, поскольку методы этого класса являются наиболее популярными и менее затратными с вычислительной точки зрения. Чаще всего они применяются для выделения мелкомасштабной турбулентности. Наиболее распространенные критерии этого класса основаны на анализе тензора градиента скорости. Исследуется применимость трех наиболее популярных критериев выделения когерентных структур (Q [1], Δ [2] и λ_2 [3]) для идентификации вихрей в данных численного моделирования различного разрешения. Для упрощения использованы данные об атмосфере -- региональный высокоразрешающий исторический атмосферный прогноз над Северной Атлантикой NAAD [4], созданный в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Данные Северо-Атлантического исторического прогноза (NAAD, North Atlantic Atmospheric Downscaling) в высоком разрешении (NAAD HiRes) представлены на сетке размером 550x550 узлов и горизонтальным шагом по пространству 14 км, что допускает разрешение вихрей мезомасштаба. А низкого разрешения (NAAD LoRes) -- 110x110 узлов с пространственным шагом 77 км, что соответствует среднему разрешению атмосферных реанализов.

В ходе исследования выявлена следующая особенность эйлеровых критериев: строгое условие вихря определяется слишком чувствительно, выделяя обширные области слившихся друг с другом КС. Это позволяет получать различные интегральные характеристики, однако не позволяет определять формы и размеры вихрей индивидуально. Поэтому для получения индивидуальных характеристик необходимо изменять строгое пороговое значение до тех пор, пока вихри не начнут выделяться отчетливо.

Кроме того, в данных высокого разрешения поля более детализированы, и на низких уровнях хорошо проявляется мелкая динамика. Таким образом, достоверно описать вихри при помощи одного значения критерия на всех высотах не представляется возможным. В силу невозможности описания одним пороговым значением критерия всей трехмерной структуры необходимо рассмотрение порогового значения как функции высоты. С целью выявления данной функциональной зависимости были посчитаны количества выделяемых когерентных структур на каждом уровне высоты и проведена аппроксимация по величинам максимумов этих количеств.

В нашем исследовании для выделения отдельных вихревых структур на каждом из вертикальных уровней была проведена кластеризация когерентных структур (рис. 1). Для этого применялся метод машинного

обучения DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise, плотностной алгоритм пространственной кластеризации с присутствием шума) [5]. При кластеризации в качестве признакового описания использовались горизонтальные координаты точек, удовлетворяющих пороговому значению критерия.

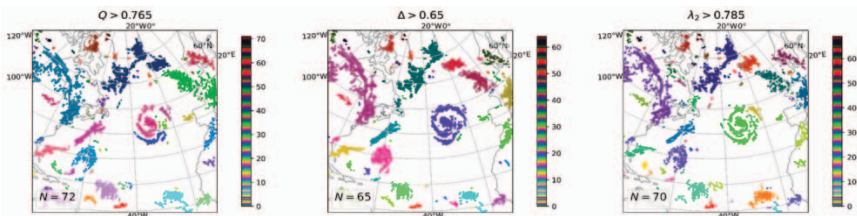


Рис. 1. Количество КС, полученные по трем методам и выделенные методом DBSCAN на высоте 500 гПа (~5.5 км) по данным высокого разрешения HiRes.

Был произведен расчет геометрических характеристик вихревых структур: определены центры, рассчитаны площади, а также радиусы в предположении формы окружности. Центром вихря считалась точка максимального значения критерия, принадлежащая данному кластеру.

На основе этих данных была получена базовая статистика вихревых когерентных структур в зимний и летний сезоны 2010 года. На рис. 2а наблюдается большое количество вихрей в нижнем слое, а затем уменьшение их количества с увеличением высоты. Это согласуется с общими представлениями - такое уменьшение обусловлено трением о поверхность Земли. Второй пик числа вихрей на высоте 10 км обусловлен влиянием тропопаузы. Это подтверждается размерами циклонов, представленными на рис. 2б - размеры циклонов постепенно растут с высотой. Для упрощения восприятия, информация на рисунке 2 приводится для фиксированного порогового значения. При более подробном рассмотрении работы будут показаны результаты с динамическим пороговым значением.

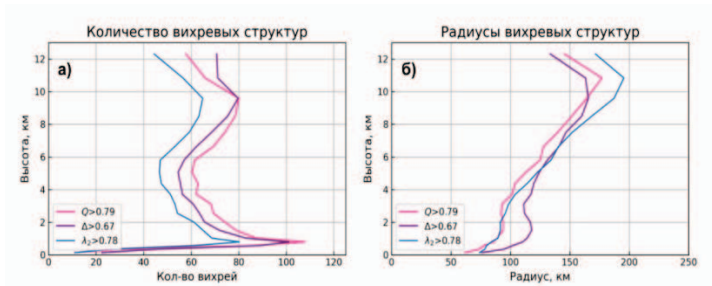


Рис. 2. Распределение количеств (а) и радиусов (б) когерентных структур по высоте в летний сезон по данным NAAD

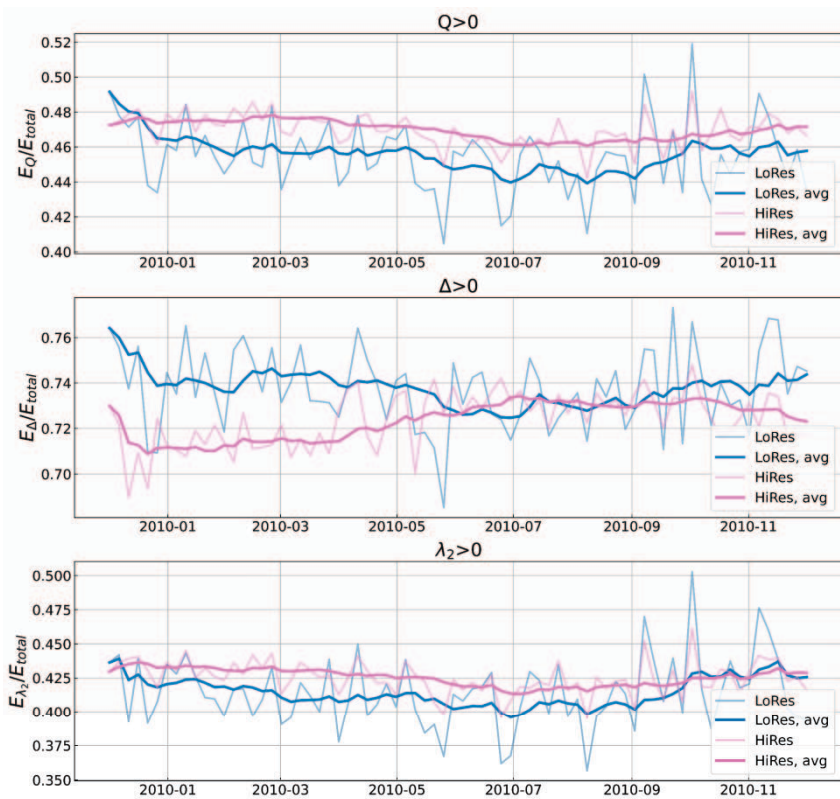


Рис. 3. Доля кинетической энергии в когерентных структурах на высоте 500 гПа (~5.5 км)

На рис. 3 приведен годовой ход кинетической энергии (КЭ), заключенной в когерентных структурах. Здесь пороговое значение сохранялось в соответствии с математической постановкой ($Q, \Delta, \lambda_2 > 0$). Доля КЭ рассчитывалась как отношение внутри областей, удовлетворяющих условию когерентности, к суммарной КЭ по всей области. Жирными линиями показаны осредненные значения полученной величины методом скользящего среднего.

Наблюдается максимум доли кинетической энергии, приходящейся на КС, в зимний период, и минимум - в летний. Это можно объяснить погодным режимом и сезонностью в Северной Атлантике: в зимний период циклоническая активность в регионе существенно более интенсивная. Отличается только Δ -критерий, который в высоком разрешении не показывает интенсивную атмосферную динамику в зимний период.

В работе показано, что все 3 критерия согласуются в воспроизведении размеров и количества вихревых структур вихревых структуры, однако при рассмотрении интегральных характеристик наиболее перспективными выглядят Q - и λ_2 -критерии. Среди оставшихся двух предпочтительным является λ_2 -критерий, поскольку он основан на физических предпосылках, что упрощает его модификацию в будущем; дополнительно этот метод позволяет отличать баротропную структуру (тропический циклон, некоторые виды полярных мезоциклонов) от бароклинной (внетропические циклоны).

Таким образом, в ходе исследования был произведен расчет критериев на данных численного моделирования атмосферы над Северной Атлантикой, разработан алгоритм вычисления статистик вихревых структур и получена функциональная зависимость порогового значения критерия от высоты.

Главный недостаток эйлерова подхода заключается в предположении несжимаемости и стационарности потока, что не является справедливым для большей части динамики как атмосферы, так и океана. Как следствие, следующим шагом работы будет применение альтернативного (лагранжевого) подхода к выделению когерентных структур. Кроме того, в дальнейшем планируется разработать алгоритм отслеживания траекторий вихревых структур.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. R. Hunt, a. a. Wray, and P. Moin. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program, (1970):193–208, 1988.
2. M. S. Chong, A. E. Perry, and B. J. Cantwell. A general classification of three-dimensional flow fields. Physics of Fluids A, 1990. ISSN 08998213. doi: 10.1063/1.857730.
4. J. Jeong and F. Hussain. On the identification of a vortex. Journal of Fluid Mechanics, 285:69–94, 1995. ISSN 14697645. doi: 10.1017/S0022112095000462.
5. A. Gavrikov, S. K. Gulev, M. Markina, N. Tilinina, P. Verezemskaya, B. Barnier, A. Dufour, O. Zolina, Y. Zyulyaeva, M. Krinitskiy, I. Okhlopov, and A. Sokov. RAS-NAAD: 40-yr High-Resolution 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, 59(5):793–817, 2020. ISSN 1558-8424. doi: 10.1175/jamc-d-19-0190.1.
6. E. Schubert, J. Sander, M. Ester, H. P. Kriegel, and X. Xu. DBSCAN revisited, revisited: Why and how you should (still) use DBSCAN. ACM Transactions on Database Systems, 42(3), 7 2017. ISSN 15574644. doi: 10.1145/3068335.

УДК 531.736

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ СРЕДЫ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМОЙ ОРИЕНТАЦИИ ИЗМЕРИТЕЛЯ

Федотов Г.А.

*АО “Морские неакустические комплексы и системы”,
Октябрьская наб., 6, 193091, Санкт-Петербург
Тел.: +7(812)676-33-99, факс +7(812)676-32-52,
g.a.fedotov@outlook.com*

**ESTIMATION OF THE ERROR IN DETERMINING THE DENSITY OF THE
MARINE ENVIRONMENT USING THE HYDROSTATIC METHOD WITH
UNCONTROLLED ORIENTATION OF THE METER**

Fedotov G.A.

Получены алгебраические выражения и построены графики, позволяющие оценить точность определения плотности морской среды предложенным ранее гидростатическим методом при неконтролируемой ориентации измерителя в пространстве.

Algebraic expressions are obtained and graphs are constructed to evaluate the accuracy of determining the density of the marine environment by the previously proposed hydrostatic method with uncontrolled orientation of the meter in space.

Данная работа продолжает цикл исследований [1,2,3], в которых рассмотрен измеритель плотности жидкости, реализующий предложенную ранее новую модификацию гидростатического метода [4], основанного на совместной обработке сигналов P_i ($i = 0,1,2,3$) четырёх датчиков давления. Метод позволяет определить величину $G \equiv |\text{grad}P|$ (модуль вектора градиента гидростатического давления), а следовательно, и искомую плотность: $\rho = G/g$ (где \vec{g} - вектор ускорения свободного падения).

Рассмотрен гидростатический измеритель, образованный четырьмя датчиками давления, расположенными в вершинах правильной треугольной пирамиды (рис.1) с длиной бокового ребра l и углом при вершине α . $b_i = (P_i - P_0)/l$, $c \equiv \cos \alpha$. Пусть для всех трех пар датчиков давления погрешность величины b_i одинакова и равна Δb . В этом случае для ΔG - погрешности определения величины G - выполняется соотношение $\Delta G = F(\varphi)\Delta b$, где функция $F(\varphi)$ приведена в [1-3].

В качестве источника ошибки определения ρ рассмотрена погрешность ΔG определения величины G . Пусть угол наклона системы φ (рис.1, слева) изменяется неконтролируемым образом, но плотность распределения угла наклона $w(\varphi)$ известна. Примем для оценок, что $w(\varphi) = \sin \varphi / (2 \sin \varphi_0)$ при $90^\circ - \varphi_0 < \varphi < 90^\circ + \varphi_0$ и $w(\varphi) = 0$ при

остальных φ (рис.1, справа). Графики соответствуют следующим значениям φ_0 : 1 - 15° , 2 - 30° , 3 - 45° , 4 - 60° , 5 - 90° .

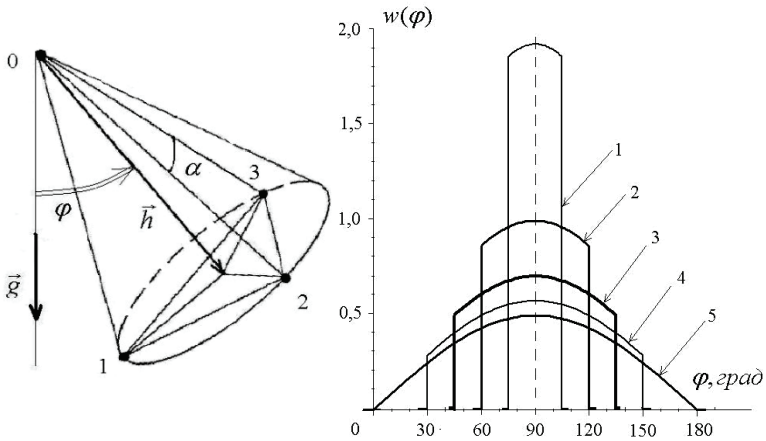


Рис. 1. Слева: наклонная ориентация системы датчиков давления в поле силы тяжести. Справа: графики $w(\varphi)$ для различных значений φ_0 .

Пояснения в тексте.

В данной работе рассмотрена практически важная ситуация, а именно, когда наиболее вероятно, что $\vec{h} \perp \vec{g}$. В этом случае погрешность определения G характеризуется функцией $\Phi(\alpha)$:

$$\Phi(\alpha) = \frac{\langle \Delta G \rangle}{\Delta b} = \int_{-\pi}^{\pi} F(\varphi)w(\varphi)d\varphi = \begin{cases} \Phi_1(\alpha); 0 < \alpha \leq 90^\circ; \\ \Phi_2(\alpha); 90^\circ \leq \alpha < 180^\circ. \end{cases}$$

Нумерация графиков функции, представленных на рис.2, соответствует тем же значениям, что и ранее на рис. 1.

Полученные алгебраические соотношения и графики полезны при рациональном выборе конфигурации датчиков давления, формирующих гидростатический измеритель, с учетом конкретных условий эксперимента [5,6].

$$\left\{ \begin{aligned} \Phi_1(\alpha) &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+2c}} \sqrt{1 + \frac{3c}{1-c} \cos^2 \varphi_0} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\sin \varphi_0} \sqrt{\frac{1+2c}{3c(1-c)}} \arcsin \left(\sqrt{\frac{3c}{1+2c}} \sin \varphi_0 \right) \sqrt{\frac{3c}{1+2c}} \right]; \\ \Phi_2(\alpha) &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+2c}} \sqrt{1 + \frac{3c}{1-c} \cos^2 \varphi_0} + \frac{1}{2} \frac{1}{\sin \varphi_0} \sqrt{\frac{1+2c}{-3c(1-c)}} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \ln \frac{\sqrt{1-c+3c \cos^2 \varphi_0} + \sqrt{-3c} \sin \varphi_0}{\sqrt{1-c+3c \cos^2 \varphi_0} - \sqrt{-3c} \sin \varphi_0} \right]. \end{aligned} \right.$$

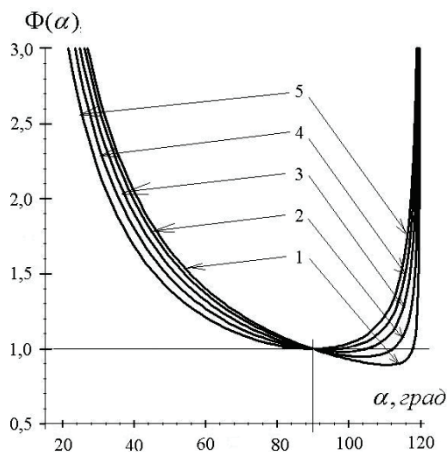


Рис. 2. Графики функций $\Phi(\alpha)$ для различных значений φ_0 . Пояснения в тексте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федотов, Г. А. Некоторые оценки точности определения плотности морской воды гидростатическим методом. / Г. А. Федотов // Сборник материалов 15-й Международной научно-технической конференции "Современные методы и средства океанологических исследований" (МСОИ-2017). Т.1, с. 135-138. - Москва, 16-18 мая 2017. Изд-во Института океанологии РАН.
2. Федотов, Г. А. Оценка точности определения плотности морской воды при неконтролируемой ориентации гидростатического измерителя / Г.

А. Федотов // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики : Труды XIV Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский научный центр Российской академии наук, 2018. – С. 275-277.

3. Федотов, Г. А. Погрешность определения плотности морской воды гидростатическим методом при неконтролируемой ориентации измерителя / Г. А. Федотов // Сборник материалов 17-й Международной научно-технической конференции “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2021). Т.1, с. 60-63. – Москва 2021. Изд-во Института океанологии РАН.

4. Федотов, Г. А. Новая модификация гидростатического метода определения плотности морской воды / Г. А. Федотов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 58-65.

5. Федотов, Г. А., Гусев, Л. Б. Патент № 2747854 С2 Российская Федерация, МПК G01N 9/26. Способ измерения плотности морской воды с подвижного носителя гидрофизической аппаратуры : № 2020116797 : заявл. 18.05.2020 : опубли. 17.05.2021 / Л. Б. Гусев, Г. А. Федотов.

6. Федотов, Г. А. О влиянии конфигурации и ориентации системы датчиков давления на точность измерения плотности морской среды гидростатическим методом. / Г. А. Федотов // В книге: Управление в морских системах (УМС-2022). 15-я мультиконференция по проблемам управления. Материалы конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 110-113.

УДК 551.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ КИПРСКИХ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД ОСОБЫМ ПОДВОДНЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ

Егорова В.М.

*Институт водных проблем РАН, ул. Губкина, 3,
119333, г. Москва, 8(499)135-54-56, vikchik96@yandex.ru*

MODELING OF CYPRUS TOPOGRAPHIC EDDIES OVER A SPECIAL UNDERWATER BARRIER

Egorova V.M.

*Water Problems Institute of Russian Academy of Science,
3, Gubkin Str, Moscow, 119333*

Представлены обобщенные решения задачи генерации Кипрских топографических вихрей над горой Эратосфен в Левантийском бассейне.

Paper presents generalized solutions to the problem of generating the Cyprus topographic Eddies over the Eratosthenes Seamount in the Levantine Basin.

Кипрские топографические вихри представляют собой квазистационарную дипольную вихревую структуру, состоящую из антициклона (интенсивного Кипрского вихря со средним диаметром 100-120 км и средними скоростями 30-45 см/с [2]) и периодически наблюдаемого к северо-западу от него циклона, оба формирующиеся в водах Левантийского бассейна южнее острова Кипр и центрального средиземноморского течения. Результаты ряда экспедиционных круизов, проводимых в регионе, подтверждают наличие изменчивой квазидипольной системы вихрей [3].

К настоящему времени мы полагаем, что вихревая система Кипра обусловлена региональной топографией дна. В работе [1] аналитически и численно показано, что причиной возникновения квази-дипольной вихревой структуры является воздействие на водный поток особого подводного препятствия неосесимметричной формы, а именно: массивной горы Эратосфена, плоская вершина которой находится на глубине около 700 м от поверхности моря. Подножие горы расположилось в глубокой впадине на отметке -2700 м и смещено относительно центра впадины к юго-востоку [4] (см. Рис 1).

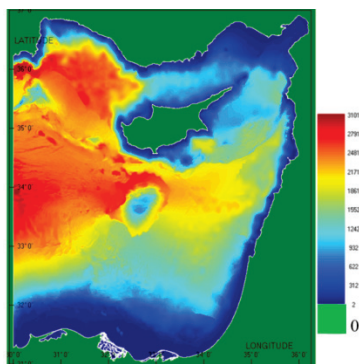


Рис. 1. Батиметрическая карта Левантийского бассейна, включающая остров Кипр и подводную гору Эратосфен.

Однако гидродинамические особенности системы вихрей требуют уточнения. Рассматриваются случаи аналитического решения поставленной задачи; численного решения в рамках трехслойной жидкости (см. Рис. 2), а также проводятся попытки лабораторного моделирования.

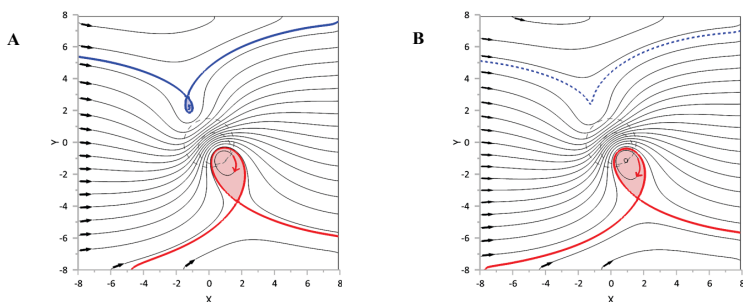


Рис. 2. Изолинии функции тока численного решения задачи Кипрского вихря. Усредненный поток $U=1\text{см/с}$ (А) и $U=1.1\text{см/с}$ (В) набегают на особую топографию и формирует квази-дипольный Кипрский вихрь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Egorova, V.M., Zyryanov, V.N., and Sokolovskiy, M.A. The hydrodynamic theory of the Cyprus Eddy. *Ocean Dyn*72(1).2022. p.1-20
2. Brenner S., Rozentraub Z., Bishop J., and Krom M. The mixed-layer/thermocline cycle of a persistent warm core eddy in the eastern Mediterranean. *Dyn Atmos Oceans* 15(3–5). 1991. p. 457-476
3. Zodiatis G., Drakopoulos P., Brenner S., and Groom S. Variability of the Cyprus warm core Eddy during the CYCLOPS project. *Deep-Sea Res* 52(2). 2005. p. 2897-2910
4. Sergi T. and François S. Seamounts. In *The Mediterranean Deep-sea Ecosystems: An Overview of Their Diversity, Structure, Functioning and Anthropogenic Impacts, with a Proposal for Their Conservation*. IUCN. ISBN 978-2-8317-0846-1. 2004. p. 32-34

**ВЛИЯНИЕ ДАУНВЕЛЛИНГА НА УТЕЧКУ ТОПЛИВА С
ЗАТОНУВШЕГО ТЕПЛОХОДА «АДМИРАЛ НАХИМОВ»**

**Мысленков С.А.^{1,2,3}, Кучейко А.А.^{4,5}, Козырева А.Ю.⁶,
Коваль Г.Я.⁵**

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, Телефон: 8(495)939-27-29,
stasoccean@gmail.com

² Гидрометцентр России,
123376, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1,
Телефон: 8(499)252-34-48, hmc@mecom.ru

³ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский проспект д. 36, Телефон: 8(499)124-61-49

⁴ Московский авиационный институт,
125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, 8(499)158-29-77,

KucheykoAA@mail.ru

⁵ ООО «РИСКСАТ»,

129515, Москва, ул. 1-я Останкинская, дом 25, кв. 37. 8(915)195-43-79,
alexindia@mail.ru

⁶ ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»,
299011, Севастополь, ул. Капитанская 2, Телефон: 8(8692)54-50-65,
anna.antonyuk88@gmail.com

THE INFLUENCE OF DOWNWELLING ON FUEL LEAKAGE FROM
SUNKEN SHIP «ADMIRAL NAHIMOV»

Myслenkov S.A.^{1,2,3}, Kucheyko A.A.^{4,5}, Kozyreva A.Y.⁶, Koval G.Ya.⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991

² Hydrometeorological Center of Russia, Bolshoy Predtechensky lane, 13,
building 1, Moscow, 123376

³ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997

⁴ Moscow Aviation Institute, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993

⁵ "RiskSat" LLC, 25, 1st Ostankinskaya Str., apart. 37, Moscow, 129515

⁶ FGBUN FITZ "Marine Hydrophysical Institute of the Russian Academy of
Sciences", Kapitanskaya str. 2, Sevastopol, 299011

В статье исследуются причины появления нефтяных загрязнений морской поверхности в районе мыса Дооб в Новороссийской бухте Черного моря в июле-октябре 2021 года. На основе анализа оптических и радиолокационных спутниковых изображений ранее было установлено, что обнаруженные слики приурочены к утечкам остатков топлива из баков затонувшего теплохода «Адмирал Нахимов», затонувшего 31.08.1986. Наличие утечки нефтепродуктов было подтверждено при инспекционном осмотре места специалистами ФГБУ «Администрация морских портов Черного моря». Анализ спутниковых изображений показал, что выход нефтепродуктов происходил с разной периодичностью. Было сделано предположение, что причиной данных выбросов могло стать явление даунвеллинга. Анализ гидрометеорологических параметров в районе исследования подтвердил гипотезу, выход нефтепродуктов из баков затонувшего теплохода приурочен к поступлению на глубину теплых масс в результате явления даунвеллинга.

The paper examines the causes of the appearance of oil pollution of the sea surface in the area of Cape Doob in the Novorossiysk Bay of the Black Sea in July-October 2021. Based on the analysis of satellite images, it was previously established that the slicks are confined to leaks of fuel residues from the tanks of the sunken ship Admiral Nakhimov, which sank in 1986. The presence of a leak of oil products was confirmed during the site inspection. The analysis of satellite images showed that the release of hydrocarbons occurred at different intervals. The analysis of hydrometeorological parameters in the study area confirmed the hypothesis that the release of oil products from the tanks of the sunken ship is timed to the inflow of warm water to the depth as a result of the downwelling phenomenon.

Основным источником для исследования послужили оптические и радиолокационные спутниковые снимки за период июль-октябрь 2021 года и их анализ методом экспертной оценки на наличие пятен в рассматриваемой акватории Черного моря. Данные снимки были получены из открытых ресурсов Sentinel Hub, который поддерживается Европейским космическим агентством (ESA).

На спутниковых изображениях обнаружены линейчатые слики длиной до 12 км с резкими краями, но незначительные по площади – до 1-1,2 кв. км. Экспертная оценка сликов осуществлена совместно с учеными из ИО РАН им. П.П. Ширшова. Сликы нефтепродуктов сгруппированы на поверхности воды вокруг точки с координатами 44°35'57" с.ш. и 37°52'46" в.д. на рис. 1,

в которой на глубине 47 м покоится теплоход «Адмирал Нахимов», затонувший 31 августа 1986 года в результате столкновения с сухогрузом «Петр Васёв» [1, 2].

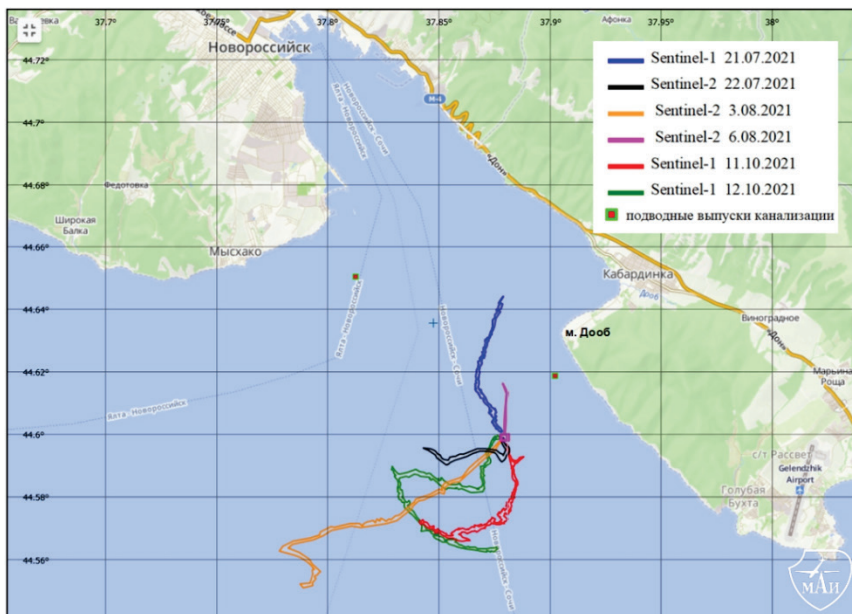


Рис. 1. Пространственная группировка пятен-сликов, идентифицированных как разливы от затонувшего парохода «Адмирал Нахимов». Веб-ГИС Геоимскер [1, 2].

Факт истечения нефтепродуктов был подтвержден в ходе инспекции района выхода нефтепродуктов на морскую поверхность специалистами ФГБУ «АМП Черного моря». Анализ имеющихся спутниковых изображений выявил нерегулярный характер появления пятен на морской поверхности. Сведения о спутниковых изображениях, на которых зафиксированы пятна нефтепродуктов с параметрами гидрометеорологической обстановки приведены в таблице 1. В ней же приведены близкие по времени даты съемки, когда признаки нефтяных загрязнений отсутствовали.

Таблица 1. Характеристика снимков за период июль-октябрь 2021 года.

Дата	Тип снимка и название спутника	Наличие слик а	Ветер (скорость и направление)	Температура поверхности моря
Июль				
19.07.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	Ю-З, 6-9 км/ч	26
21.07.2021	РЛИ, Sentinel-1	Есть	Ю-З, 14-15 км/ч	29
22.07.2021	Оптический, Sentinel-2	Есть	З, 7-8 км/ч	26
24.07.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	С, 10-12 км/ч	24
31.07.2021	РЛИ, Sentinel-1	Есть	Ю-З, 5-6 км/ч	27
Август				
01.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	З, 6 км/ч	27
02.08.2021	Оптический, Landsat-8	Есть	Ю, 7-8 км/ч	27
03.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Есть	Ю, 6 км/ч	27
06.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Есть	Ю, 20 км/ч	26
18.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	Ю-З, 10 км/ч	26
21.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Есть	З, 10-11 км/ч	26
28.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	С-З, 9-11 км/ч	26
31.08.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	З, 13-14 км/ч	27
Сентябрь				
12.09.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	Ю-В, 7-8 км/ч	22

Октябрь				
11.10.2021	РЛИ, Sentinel-1	Есть	В, 6 км/ч	19
12.10.2021	РЛИ, Sentinel-1	Есть	С-В, 3-4 км/ч	19
15.10.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	С, 13 км/ч	20
27.10.2021	Оптический, Sentinel-2	Нет	С, 10 км/ч	18

Вероятной причиной просачивания нефтепродуктов из баков теплохода «Адмирал Нахимов» может быть явление даунвеллинга. Повышение температуры окружающей воды вокруг судна могло привести к изменению агрегатного состояния остатков топлива в судовых баках и просачиванию легких фракций. Достаточно хорошо проявления наблюдались в последней декаде июля, первой декаде августа и в конце первой декады октября. На приведенном ниже графике рис. 2 температуры косы, расположенной около мыса Утриш, выделяются именно эти периоды, с высокими температурами на глубине 33 метра, что подтверждает гипотезу о прогреве находящихся на дне углеводородов и всплывание легких фракций.

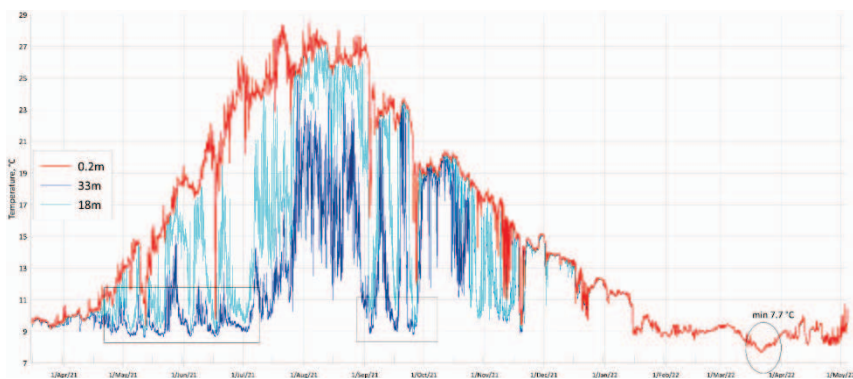


Рис. 2. Данные температуры на глубине 33 м с косы, расположенной около мыса Утриш.

Дополнительно в работе проанализированы поля температуры, геострофической скорости течений, скорости ветра по данным с

Морского портала ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН» [3]. В результате анализа данных установлено наличие комбинированного даунвеллинга в указанные периоды в исследуемом районе.

Даунвеллинг – это явление, при котором ветер, дующий на север вдоль восточных границ океанов и на юг вдоль западных вызывает течение, которое в результате действия силы Кориолиса отклоняется вправо, то есть направлено к берегу. В итоге поверхностные воды сгоняются к берегу и погружаются на глубину. Обычно поверхностные воды более тёплые, но несмотря на это, в результате динамического процесса, они попадают в нижележащие слои океана, а вместе с ними туда перемещаются тепло и растворенные вещества, в частности кислород.

Одними из предпосылок к появлению даунвеллинга служит южный и юго-западный ветер в течение нескольких дней и высокая температура поверхности моря. В ходе анализа метеорологических данных (направление и скорость ветра, а также температура поверхности моря) в рассматриваемой акватории установлено, что за несколько дней до первого замеченного случая истечения (от 21.07.21 г.) ветер имел Ю-З направление. Также, в дни истечений, ветра в большинстве своем имели либо Ю-З, либо З направления, что могло приводить к нагону теплой поверхностной воды на глубину.

Авторы выражают признательность Станичному С.В. и Зацепину А.Г. за материалы и помощь в подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новости МАИ 35 лет под водой: студенты МАИ обнаружили разлив топлива в Чёрном море. <https://mai.ru/press/news/detail.php?ID=161028#> (Дата обращения 14.01.2023).
2. Новости ГК «СКАНЭКС». Утечки нефтепродуктов из затонувшего теплохода «Адмирал Нахимов». <https://www.scanex.ru/company/news/utechki-nefteproduktov-iz-zatonuvshego-teplokhoda-admiral-nakhimov/> (Дата обращения 14.01.2023).
3. Морской портал. Архив данных по Черному морю. http://dvs.net.ru/mp/data/main_ru.shtml (Дата обращения 14.01.2023).

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПАССИВНОЙ
ПРИМЕСИ В ПОВЕРХНОСТНОМ И ПОДПОВЕРХНОСТНОМ
СЛОЯХ В ПОТОКЕ НАД ПОДВОДНОЙ ВОЗВЫШЕННОСТЬЮ В
ОКЕАНЕ**

М.В. Шатохин¹

¹ *Институт водных проблем Российской академии наук,
119333, Москва, ул. Губкина, д. 3, +79687670805, usif-9694@mail.ru*

**NUMERICAL SIMULATION OF THE DYNAMICS OF A PASSIVE
ADMIXTURE IN THE SURFACE AND SUBSURFACE LAYERS IN A FLOW
ABOVE AN UNDERWATER OBSTACLE IN AN OCEAN**

M.V. Shatokhin¹

¹ *Water Problems Institute of Russian Academy of Science,
3 Gubkina str., Moscow, 119333, Russia*

В рамках трехслойной квазигеострофической модели в приближении f-плоскости проведено численное исследование воздействия изолированной осесимметричной подводной возвышенности на движение поверхностных и подповерхностных пятен нейтральной примеси, переносимых вертикально однородным зональным течением.

Within the framework of a three-layer quasi-geostrophic model in the f-plane approximation, a numerical study of the effect of an isolated submarine obstacle on the movement of surface and subsurface patches of a neutral admixture transferred by a vertically homogeneous zonal current was carried out.

К настоящему времени человечество столкнулось с тем, что развитие цивилизации неизбежно связано с непрерывным загрязнением океанов. От состояния воды зависит не только глобальная экосистема, но океан также во многом определяет погоду и климат на планете. Поэтому проблема изучения распространения загрязнения морской среды выдвигается в разряд первоочередных.

Различные аспекты проблемы, связанные с механизмами распространения загрязнений рассмотрены многими авторами, например, [1-18]. Однако по-прежнему малоизученными остаются вопросы горизонтального распространения примеси под влиянием внешнего поля скоростей. В настоящей работе предпринимается попытка исследовать некоторые особенности этого процесса, а именно, ставится цель определить степень влияния захватывающих свойств изолированной подводной горы на перемещающиеся в вертикально-однородном зональном потоке пятна поверхностной/подповерхностной нейтральной примеси, которую можно считать динамически, химически и биологически пассивной. В рамках трехслойной модели под поверхностным/подповерхностным пятном будем понимать пятно примеси, принадлежащее верхнему/среднему слою.

В настоящей работе в качестве эталонной изолированной горы выбран гайот Затонского [19], принадлежащий массиву Магеллановых гор. Подробное геоморфологическое описание гайота дано в [20]. В качестве теоретической модели применялась трехслойная модификация метода контурной динамики [21]. Модель позволяет исследовать динамику вихревых пятен, расположенных в каждом из слоев (под пятном примеси будем понимать вихревое пятно с нулевой потенциальной завиренностью, такое пятно является пассивным и не влияет на движение жидких частиц за пределами его границ), а также строить послойные фазовые портреты – картины изолиний функций тока для каждого из слоев. При достаточно слабых значениях скоростей фонового течения в фазовых портретах наблюдаются сепаратрисы – особые изолинии функции тока, имеющие гиперболическую точку самопересечения и разделяющие фазовую плоскость на области с качественно различными свойствами движения. Внутренние части петель сепаратрис мы отождествляем с топографическими антициклоническими вихрями. Последние имеют максимальные размеры в нижнем слое, промежуточные в среднем слое и минимальные в верхнем.

На рисунке 1 представлены результаты численного эксперимента (в виде фазовых портретов для верхнего и среднего слоев с выделенными черным цветом сепаратрисами и изображенных на их фоне мгновенных конфигураций контуров границ пятен примеси), когда центры первоначально круговых пятен расположены вблизи западного уса сепаратрисы на значительном расстоянии от возвышенности с центром в точке $(0, 0)$, радиус пятен 50 км. Начальные положения центров поверхностного и подповерхностного пятен находятся выше по потоку от возвышенности и несколько южнее сепаратрисы для верхнего и среднего слоев в точке $(-300, -275)$.

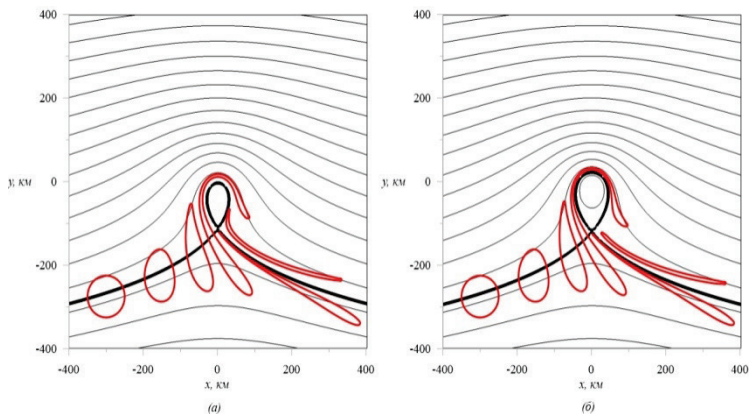


Рис. 1. Временная эволюция поверхностного (а) и подповерхностного (б) пятна примеси (контуры первоначально круговых пятен изображены красными линиями) в восточном вертикально однородном потоке

При этом сепаратрисы делят пятна на неравные части: большая на юге и меньшая на севере. В обоих случаях пятна сносятся потоком в восточном направлении и одновременно вытягиваются в продольном направлении таким образом, что большая/меньшая часть подвержена преимущественному воздействию течения ниже/выше сепаратрисы. При приближении к возвышенности вытягивание усиливается, далее верхняя часть пятна обходит петлю с севера, а нижняя с юга. Далее происходит окончательное разделение пятна на две части таким образом, что обе части продолжают продвигаться на восток вдоль восточного уса сепаратрисы, прижимаясь к нему, но оставаясь по разные стороны от него. Очевидно, в среднем слое влияние топографии на движение пятна оказывается незначительно более сильным, чем в верхнем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В., Хублярян Г.М. // Водные ресурсы. 2004. 316 № 1. С. 31-39.
2. Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. // Сообщ. по прикл. матем. М.: ВЦ РАН 2005.
3. Архипов Б.В., Котеров В.Н., Солбаков В.В., Шапочкин Д.А. Юрезанская Ю.С. //Ж. Вычисл. Матем и Матем. Физ. 2007. 47, №2. С. 288-301.
4. Воропаева О.Ф., Чашечкин Ю.Д., Черных Г.Г. // Вычислительные

технологии. 1996. № 1. С. 38-47.

5. Дикинов Х.Ж., Ксенофонтов А.С., Москаленко Л.А. // Тропическая метеорология. Л.: Гидрометеиздат, 1987.

6. Дмитриев Н.В., Двуреченская Е.А. // Метеорология и гидрология. 1994. № 12. С. 53-62.

7. Зайцев О.В., Зайцева Т.В. // Тр. Дальневост. Регион. НИИ. Владивосток. 1984. Вып. 131. С. 50-61.

8. Земляная Н.В. // Вестник ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 27-36.

9. Земляная Н.В., Н.И. Савельева // Технические средства исследования Мирового океана. Владивосток, 1994.

10. Кордзадзе А.А., Деметрашвили Д.И. // Морской гидрофизический журнал. 2015. 180, № 1. С. 3-15.

11. Коротенко К.А. // Океанология. 1990. 30, Вып. 4. С. 546-549.

12. Коротенко К.А., Лелявин С.Н. // Океанология. 1990. 30, Вып. 5. С. 930-936.

13. Кочергин В.П., Сухоруков В.А., Цветова Е.А. // Численные методы расчета океанических течений. Новосибирск. ВЦ СИБ. Отд. АН СССР, 1974, С. 129-153.

14. Озмидов Р.В. // Диффузия примесей в океане // Л. Гидрометеиздат. 1986.

15. Alomar C., Estarellas F., Deudero S. // Mar. Environ. Res. 2016. 115, P. 1-10.

16. Grant H.L., Moilliet A., Vogel W.M. // J. Fluid Mech. 1968. 34, № 3. P. 443-448.

17. Luibartseva S., Coppini G., Lecci R., Clementi E. // Mar. Pollut. Bull. 2018. 129. P. 151-162.

18. Lozovatsky I.D., Ksenofontov A.S., Erofeev A. Yu., Gibson C.H. // J. Mar. Syst. 1993. № 4. P. 263-273.

19. <http://guyot.ocean.ru/baza-dannykh/gajot-zatonskogo.html>

20. http://www.spbc.nw.ru/sites/default/files/users/anton/otchet_po_nir_.pdf

21. Соколовский М.А. // Изв. АН СССР. ФАО. 1991. 27. № 5. С. 550-562.

**ВЛИЯНИЕ ТИПА СУРОВОСТИ ЗИМ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ**

Лобчук О.И., Буканова Т.В., Чубаренко И.П.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(921)619-12-85,
olga_may87@mail.ru*

**INFLUENCE OF THE TYPE OF SEVERITY WINTERS ON THE
INTEGRAL CHARACTERISTICS OF THE COLD
INTERMEDIATE LAYER OF THE BALTIC SEA**

Lobchuk O., Bukanova T., Chubarenko I.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997*

Целью данной работы является оценка интегральных характеристик вод Холодного промежуточного слоя (ХПС) Балтийского моря в зависимости от суровости зим, а именно: температуры и солёности ядра и слоя ХПС, мощности слоя, положения верхней и нижней границ слоя, и их пространственно-временная динамика.

The purpose of this work is assessment of the integral characteristics of the cold intermediate layer (CIL) of the Baltic Sea depending on the severity of winter, namely: temperature and salinity in the core and within the CIL, thickness of layers, upper and lower boundaries of the layer, and their presence-temporal dynamics.

Характерной для Балтики физической особенностью является присутствие так называемого Холодного промежуточного слоя, который формируется ежегодно. ХПС проявляется как слой низких температур между термоклином и постоянным галоклином с весны до конца осени. Вертикальная конвекция вследствие охлаждения атмосферы и ветрового перемешивания размывает сезонный термоклин в осенне-зимний период [1, 2, 3]. Температура воды в ХПС коррелирует с суровостью предыдущей зимы [4, 5]. Весной после образования термоклина температура ХПС часто

бывает ниже температуры максимальной плотности (T_{md}), вероятнее всего из-за адвекции несколько более соленой и плотной воды [2, 3].

Начиная с 2014 года в регионе Балтийского моря, из 8 зим отмечено 6 мягких и 2 умеренно теплые зимы [6], что вероятно внесло вклад в динамику характеристик как всего ХПС, так и его ядра - подслоя самой холодной воды.

Данная работа поможет ответить на следующий вопрос: каковы современные тенденции изменения интегральных характеристик вод Балтийского ХПС во времени и пространстве с учетом типа суровости / мягкости прошедших зим.

В результате выяснено, что после мягкой зимы формируется более мощный по толщине ХПС и температурой воды выше T_{md} , отделённый от нижележащих слоёв более жёстким пикноклином. После суровой (холодной и ветреной) зимы ХПС тоньше, холоднее (температура воды ниже T_{md}), но основной пикноклин под ним – мягче. Таким образом, воды ХПС формируются каждую зиму, только «условия жизни» такой воды разные.

Исследование выполнено при поддержке государственного задания № FMWE-2021-0012.

ЛИТЕРАТУРА

1. Leppäranta M., Myrberg K. *Physical Oceanography of the Baltic Sea*, Springer-Verlag, 378 pp., ISBN 978-3-540-79702-9, 2009.
2. 2009.
3. Stepanova N. B. Vertical structure and seasonal evolution of the cold intermediate layer in the Baltic Proper, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 195, 34–40, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.05.011>, 2017.
4. Чубаренко И.П., Н.Ю. Демченко, Е.Е. Есюкова, Лобчук О.И., Карманов К.В., Пилипчук В.А., Исаченко И.А., Кулешов А.Ф., Чугаевич В.Я., Степанова Н.Б., Кречик В.А. Формирование весеннего термоклина в прибрежной зоне Юго-Восточной Балтики по экспедиционным данным 2010-2013 гг. // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – № 5. – С. 702-709. – DOI 10.7868/S0030157417050045.
5. Hinrichsen H.-H., Lehmann A., Petereit C., Schmidt J. Correlation analysis of Baltic Sea winter water mass formation and its impact on secondary and tertiary production, *Oceanologia*, 49, 381–395, 2007.
6. Liblik T., Lips U. Characteristics and variability of the vertical thermohaline structure in the Gulf of Finland in summer, *Boreal Environ. Res.*, 16A, 73-83, 2011.
7. Baltic Sea Icebreaking Report 2020-2021. <http://baltice.cloudapp.net/app/static/pdf/BIM%20Report%202020-2021.pdf>

**ИНЕРЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ПО ДАННЫМ
ИЗМЕРЕНИЙ IN SITU И В МОДЕЛИ DieCAST**

Мельников В.А., Коротенко К.А.

*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8 (499) 124-63-83,
vmelnikov@ocean.ru*

**INERTIAL OSCILLATIONS ACCORDING TO THE DATA
IN SITU AND DIECAST MODEL**

Melnikov V.A., Korotenko K.A.

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

В работе представлены результаты применения гидродинамической вихререзающей модели DieCAST для описания свойств инерционных колебаний (далее ИК) и квази- инерционных волн (КИВ), наблюдаемых в Чёрном море (ЧМ). Описывается сдвиг по частоте инерционного спектрального максимума под влиянием завихренности фоновых течений и других факторов. Моделируются проявления ИК в полях 3D скорости течений, температуры воды и уровня моря вблизи берега. Обсуждается генерация КИВ в придонном слое моря. Рассматриваются случаи вращения вектора скорости ИК против часовой стрелки и перемежаемость ИК.

The paper presents results of applying the DieCAST hydrodynamic eddy-resolving model to describe properties of inertial oscillations and quasi-inertial waves observed in the Black Sea. The frequency shift of the inertial spectral maximum under the influence of the mean flow vorticity and other factors is described. The manifestations of inertial oscillations in the fields of 3D flow velocity, water temperature and sea level near the coast are modeled. The generation of near-inertial waves in the bottom layer of the sea is discussed. The cases of counterclockwise rotation of the inertial velocity vector and inertial oscillations intermittency are considered.

Измерения *in situ* на ЧМ очень затратны и недостаточно подробно по пространству [1]. Спутники «видят» обширные акватории, но только на поверхности моря. К тому же, типичное разрешение осреднённых спутниковых «продуктов» (по горизонтали ~ 60 морских миль) не является удовлетворительным для исследования мезомасштабных процессов. В условиях таких ограничений трудно провести интерпретацию флуктуаций океанографических параметров в рамках существующих представлений о сложных вихревых полях. Дополнительные возможности для изучения гидрометеорологической системы ЧМ региона предоставляет численное моделирование гидродинамических процессов, в том числе и ИК. С этой целью применяется гидродинамическая модель циркуляции моря DieCAST с высоким разрешением (2 м.мили). Описание модели можно найти на сайте <http://efdl.as.ntu.edu.tw/research/diecast> и в работах [2],[3].

Для ряда точек ЧМ, где имеются данные контактных измерений ИК, были рассчитаны временные ряды скорости течений и гидрологических флуктуаций. Целью работы является сопоставление расчётных и контактных измерений для интерпретации ИК и верификации модели DieCAST.

В открытом океане, как было установлено в результате многочисленных исследований, имеются 3 источника ИК и КИВ. Первый источник – переменные атмосферные воздействия (шквалы, шторма и ураганы) - ветер, давление, осадки, с глобальной мощностью ~ 0,16–0,50 ТВт [4], Второй источник - внутренние “запрепятственные” волны при обтекании рельефа дна квази-стационарными течениями с глобальной мощностью 0,06–0,51 ТВт [5]. Для сравнения: бароклинные приливы, возникающие при обтекании рельефа дна приливными течениями, вносят в энергетический баланс океанов в два раза большую мощность - порядка 1ТВт, [5]. Тем не менее, приливные течения могут превращаться при определённых условиях в КИВ [6]. Однако, оценка вклада ветровой энергии в КИВ имеет большой разброс, т.к. до сих пор детали генерации и распространения КИВ в океане не ясны.

Включение КИВ и приливов в модели циркуляции океана были предприняты в ряде работ: смотри обзор в [7]. В [8] было выполнено моделирование циркуляции океана с высоким разрешением (1/488 град) с учётом приливных и атмосферных воздействий. Оказалось, что для адекватного представления инерционных волн в модели необходимо учитывать изменчивость ветра на временных масштабах менее 6 ч. и на пространственных масштабах менее 15 км.

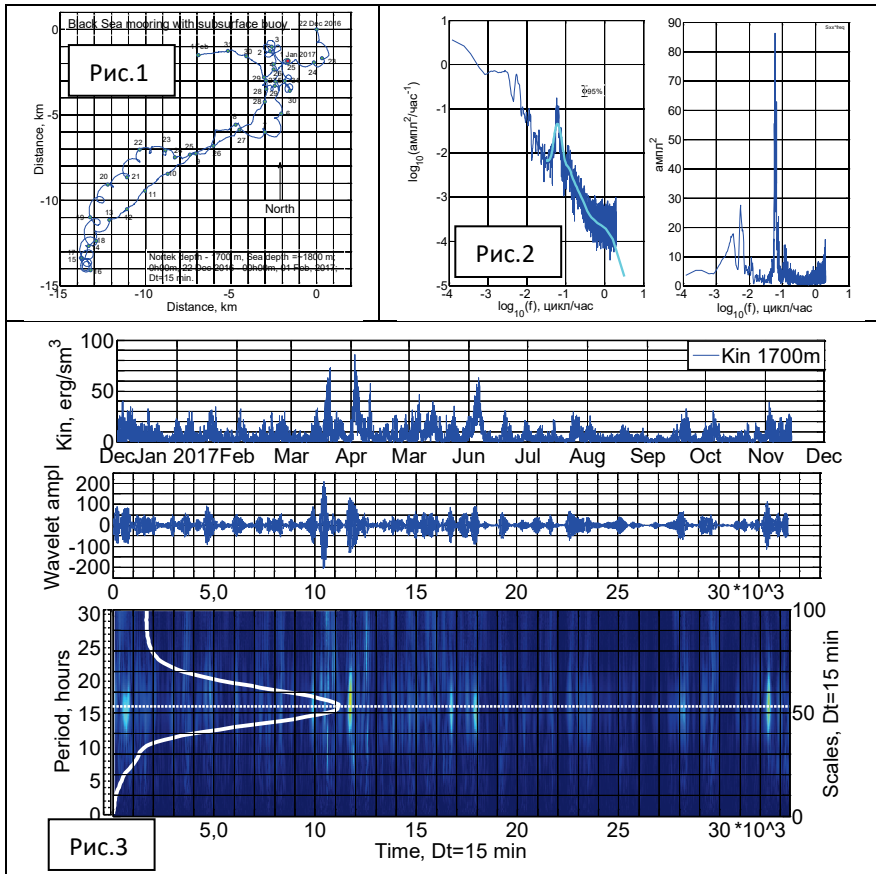


Рис. 1. Разнообразные по форме инерционные колебания в придонном слое на глубине 1700м, у подножия северо-западного материкового склона ЧМ.

Прогрессивная векторная диаграмма течений.

Рис. 2. Инерционный пик в спектральной плотности Фурье на глубине 1700 м.

Рисунок слева – спектр плотности кинетической энергии течений $Kin=0.5\rho(U^2+V^2)$, $U(\text{east})$ и $V(\text{north})$ (синяя линия); спектр проинтегрированной по времени вейвлет-плотности Kin - зелёная светлая линия; панель справа - спектр дисперсий; «ампл» – в эрг/см^3 .

Рис. 3. Переमेжаемость инерционных колебаний на глубине 1700 м.

Верхняя панель: Ход по времени суммарной плотности кинетической энергии течений Kin . Средняя панель: Вэйвлет- амплитуда Kin на инерционном периоде $T_{инерц}=17.34$ час. Нижняя панель: вэйвлет-плотность Kin в диапазоне периодов 0-30 час.

В ЧМ обнаруживаются разнообразные формы инерционных волн и вблизи поверхности, и в придонном слое моря, рис. 1. Развитие инерционных колебаний около дна обусловлено обтеканием рельефа дна стратифицированными течениями, а также резкими колебаниями атмосферного давления. Вблизи поверхности моря инерционные течения генерируются шквалистым ветром. Спектральные максимумы на инерционной частоте имеют, как правило, тонкую структуру, что обусловлено влиянием завихренности фоновых течений и другими факторами, рис.2. Недалеко от береговой линии инерционные течения усиливаются и, в результате адвекции, на спектрах температуры воды и уровня моря появляется инерционный пик. Рассматриваются случаи вращения вектора скорости ИК против часовой стрелки и перемежаемость ИК, рис.3.

Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № 0128-2021-0002, а также при выполнении темы 4.6.11 Государственного океанографического института им. Н.Н. Зубова Росгидромета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Palazov, A., et al. Black Sea Observing System // *Front. Mar. Sci.*-2019.- P. 6:315.
2. Dietrich, D.E., Lin, C.A., Mestas-Nunez, A., et al. A High Resolution Numerical Study of Gulf of Mexico Fronts and Eddies // *Meteorol. Atmos. Phys.* -1997. - V. 64.- P. 187–201.
3. Коротенко, К.А. Моделирование мезомасштабной циркуляции Черного моря // *Океанология.* -2015.-Т. 55.- № 6.- С. 909–915.
4. Alford, M. H. Global calculations of local and remote near-inertial wave dissipation// *J. Phys. Oceanogr.*-2020a.-50.- P.3157–3164.
5. Shakespeare, C. Interdependence of internal tide and lee wave generation at abyssal hills: Global calculations//*J. Phys. Oceanogr.*-2020.-50. P. 655–677.
6. Иванов, Ю.А., Мельников, В.А., Новицкий, А.Г. Обтекание неровностей дна стратифицированным потоком // *Известия АН СССР, серия ФАО.* 1977. Т. 13. № 12. С. 1278–1286.
7. Raja, K.J., et al. Near-Inertial Wave Energetics Modulated by Background Flows in a Global Model Simulation// *J. Phys. Oceanogr.*- 2022.- Vol. 52.- No. 5.-P. 823, 1520-0485.
8. Flexas, M.M., et al. Global estimates of the energy transfer from the wind to the ocean, with emphasis on near-inertial oscillations// *J. Geophys. Res. Oceans.* - 2019.-124.- P.5723–5746.

**СПЕКТРЫ ДАВЛЕНИЯ И ТЕЧЕНИЙ В БУХТЕ КРУГЛАЯ
(Г. СЕВАСТОПОЛЬ) В ИЮЛЕ-АВГУСТЕ 2022 Г.**

Багаев А.В.¹, Шутов С.А.¹, Щербаченко С.В.¹, Удовик В.Ф.¹

¹ *Морской гидрофизический институт РАН,
299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2, +7(978)7678184,
a.bagaev1984@gmail.com*

**SEA WATER PRESSURE AND VELOCITY SPECTRUM OF
THE KROUGLAYA BAY (SEVASTOPOL)
IN JULY-AUGUST 2022**

Bagaev A.V.¹, Shutov S.A.¹, Scherbachenko S.V.¹, Udovik V.F.¹

¹ *Marine Hydrophysical Institute RAS,
299011, Sevastopol, Kapitanskaya Str., 2, +7(978)7678184,
a.bagaev1984@gmail.com*

В работе представлены результаты постановки донной станции в прибрежной части Гераклейского полуострова (бухта Круглая, г. Севастополь). Измерения давления (волнограф) и течений (прибор МГИ -1308) проводились с 27.07 по 03.08 2022 г. Выявлены спектральные максимумы, соответствующие теоретическим локальным собственным периодам системы бухт г. Севастополя.

This paper presents the results of a bottom station installation in the coastal part of the Heracleean Peninsula (Krouglaya Bay, Sevastopol). Pressure and currents were measured from 27.07 to 03.08 2022. Spectral maxima corresponding to the theoretical local eigen-periods of the Sevastopol bay system were identified.

Несмотря на длительную историю океанологических наблюдений в Черном море, до сих пор ряды наблюдений за уровнем и течениями в системе Севастопольских бухт разрозненны и отрывочны. Теоретические и модельные исследования спектральных характеристик колебаний уровня моря представлены в работах [1, 2]. Собственные колебания системы Севастопольских бухт рассчитаны в работах [3, 4].

В статье отражен опыт постановки автоматизированной донной станции в прибрежной части одной из бухт Гераклейского полуострова (б. Круглая) на протяжении недели (июль-август 2022 г.). Приводится краткий анализ спектров колебаний подводного давления и течений.



Рис. 1. Схема размещения оборудования в прибрежной части бухты Круглая.

Бухта Круглая (рис. 1) относится к наименее изученным из входящих в систему севастопольских бухт. Она используется для размещения рекреационных объектов. Ширина бухты у входных мысов 650 м, максимальная - около 800 м. Вглубь суши она вдается на 1200 м. Преобладающие глубины -- до 3 м. У входа в бухту глубины достигают 15 м, нарастая в сторону открытого моря [5].

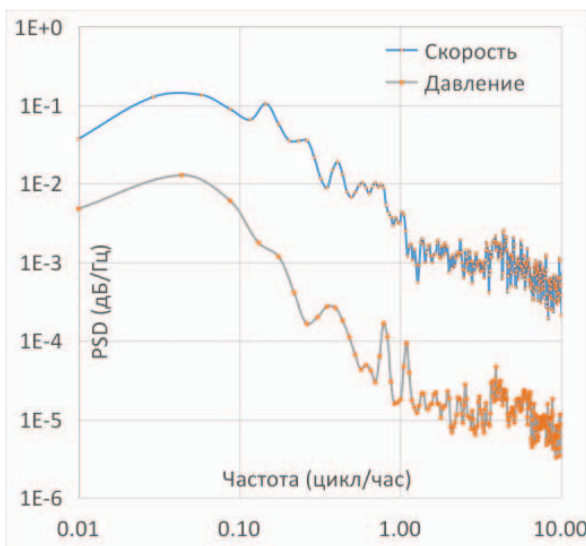


Рис. 2. Диаграммы спектральной плотности энергии колебаний давления, модуля скорости течений.

С 27.07 по 03.08 была установлена донная станция (см. рис. 1) в виде металлической рамы с закрепленными приборами и грузами. Измерители течений МГИ-1308 были закреплены неподвижно. Импеллеры расположены на глубине 70-75 см от дна (глубина около 2,1 м). Один измеритель течений (№ 2010) располагается по отношению к другому измерителю (№ 118) под углом в 90°. Волнограф-мареограф расположен сбоку от рамы на высоте около 1,5 м от дна (глубина около 1,3 м). Глубина дна в точке размещения около 2,8 м. Дно песчаное. Рама ориентирована так, что ось одного из импеллеров параллельна свайному пирсу. Азимут: 311 градусов (для №0118) и 41 градус (для №2010). Дискретность измерений МГИ-1308: 1 минута. Волнограф-мареограф с дискретностью 10 с записывал мгновенные значения давления и температуры.

Результаты спектрального анализа и выявленные максимумы показаны на рис. 2. Расчеты произведены средствами ЯП Python с помощью пакета numpy с вычитанием линейного тренда. Ширина спектрального окна 2048 точек, перекрытие 2000 точек, метод сглаживания - окно Хана. Для удобства сравнения значения энергии нормированы на частоту.

На спектрах присутствуют суточные максимумы на периодах 23 ч, а полусуточный период (12 ч) и локальная инерционная частота моря (17 ч)

практически не выражены. Широко представлены более высокочастотные колебания: 7 ч, 3,8 ч, 2,7 ч, 1,3 ч (отмеченный также в [2]), 57 мин., 15 мин., 10 мин (рассчитанный в [4]).

Работа выполнена в рамках госзадания по теме МГИ «Прибрежные исследования» FNNN-2021-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев, И. П. Дисперсионный анализ колебаний уровня Черного моря в широком диапазоне частот / И. П. Медведев // Морской гидрофизический журнал. – 2018. – Т. 34. – № 6(204). – С. 489-500. – DOI 10.22449/0233-7584-2018-6-489-500.
2. Медведев, И. П. Численное моделирование метеорологических колебаний уровня Черного моря / И. П. Медведев // Океанология. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 546-557. – DOI 10.31857/S0030157422040086.
3. Манилюк, Ю. В. Сейши и Тягун в севастопольской бухте / Ю. В. Манилюк // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2018. – № 3. – С. 4-12. – DOI 10.22449/2413-5577-2018-3-4-12. \
4. Манилюк, Ю. В. Исследование сейшевых колебаний в смежных бухтах на примере Севастопольской и Карантинной бухт / Ю. В. Манилюк, Д. И. Лазоренко, В. В. Фомин // Морской гидрофизический журнал. – 2020. – Т. 36. – № 3(213). – С. 261-276. – DOI 10.22449/0233-7584-2020-3-261-276.
5. Горячкин, Ю. Н. Морские берега Крыма: Монография / Ю. Н. Горячкин, В. В. Долотов. – Севастополь: ООО "КОЛОРИТ", 2019. – 256 с. – ISBN 978-5-9908460-8-1.

УДК 551.5

ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДИНАМИКУ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА В МОРЯХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Степанов В.В.¹, Ставров К.Г.², Павлова Е.А.¹

¹ Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, ул. Беринга, 38, 199397, г. Санкт-Петербург, 8(812)3373123, Pavlova@aari.ru

² Государственный научно-исследовательский навигационно-гидрографический институт, Кожевенная линия ВО, 41, 199106, г. Санкт-Петербург, 8(962)7271886, mail@gningi.ru

OCEANOGRAPHIC FACTORS DETERMINING THE DYNAMICS OF ICE COVER IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS

Stepanov V.V.¹, Stavrov K.G.², Pavlova E.A.¹

¹ *Arctic and Antarctic Research Institute, 38 Bering St., 199397, St. Petersburg, 8(812)3373123, Pavlova@aari.ru*

² *State Scientific Research Navigation and Hydrographic Institute, Kozhevennaya liniya VO, 41, 199106, St. Petersburg, 8(962)7271886, mail@gningi.ru*

В докладе представлен подход к описанию динамических процессов в ледяном покрове по рисунку нарушения его сплошности. Проведён анализ рисунков нарушений сплошности ледяного покрова, рассмотрено развитие процессов, данные анализа сопоставлены с экспедиционными данными.

The report presents an approach to the description of dynamic processes in the ice cover according to drawing of cracks in it. The analysis of drawing of cracks of the ice cover is carried out, the development of processes is considered, the analysis data are compared with the expedition data.

Важнейшим элементом специального гидрометеорологического обеспечения морских операций в замерзающих морях является информация о состоянии ледяного покрова. Своевременное знание особенностей распределения льда на поверхности моря и динамики его распределения во времени дают возможность выбирать оптимальный вариант плавания судов, а также соблюдать сроковую дисциплину и правильную оценку возможного влияния гидрометеорологических факторов на использование технических средств.

Динамика потоков тепла и влажности между океаном и атмосферой играют основную роль в формировании, распределении толщины и деформации льда.

Одновременно происходящие процессы различного масштаба, таких как ветровое давление, влияние течений, влияние силы Кориолиса, приливно-отливные силы, градиенты атмосферного давления, внутреннее напряжение в массиве льда, влияния пограничного слоя и наклона морской

поверхности формируют мгновенную картину рисунка нарушения сплошности ледяного покрова [1, 2].

Использование метеорологических и ресурсных искусственных спутников Земли позволяет проводить непосредственные наблюдения процессов синоптического масштаба в океане и атмосфере [3].

В 80-х годах М. Назировым был предложен метод квазисиноптического анализа рисунка изображения ледяного покрова [4]. Суть метода заключается в том, что на изображении ледяного покрова соединяют между собой плавными линиями достаточно четко прослеживаемые каналы, полыньи и разводья. Эти линии можно экстраполировать по направлению перемещения, ориентируя их преимущественно вдоль длинных осей крупных льдин, и по полученному полю линий с учетом других факторов определяют зоны и причины взаимного вклинивания ледяных полей [4].

На основе анализа регулярных космических данных показано, что наиболее устойчивые черты пространственной структуры ледяного покрова формируются, главным образом, вследствие гидро-термо-динамического воздействия на лёд водных масс, в силу чего взаимные вклинивания ледяных массивов, отображаемые на космических снимках, могут быть использованы в качестве индикаторов некоторых процессов динамики не только приповерхностных, но и глубинных слоев морских вод [4].

В рамках исследования был проведён анализ космической снимков в видимом диапазоне путём выявления структуры и рисунка нарушений сплошности ледяного покрова (трещин, полыней, разводий), как индикаторов динамических процессов в ледяном покрове. По серии последовательных снимков рассмотрено развитие и затухание процессов. Пример анализа рисунка нарушений сплошности ледяного покрова показан на рисунке 1.

По характеру и взаимному положению трещин, полыней и разводий можно судить о процессах, происходящих в ледяном покрове, кроме того, элементы нарушения сплошности ледяного покрова могут свидетельствовать о процессах, которые возможны в ближайшем будущем. Трещины в сплошном льду могут свидетельствовать о начальных стадиях подвижек льда, сжатиях. Данные теоретические заключения были сопоставлены с данными экспедиционных исследований.



Рис. 1. Пример анализа рисунка нарушений сплошности ледяного покрова 24.05.2014 г. (толстыми серыми стрелками обозначены направления потоков)

ЛИТЕРАТУРА

1. Thorndike, A.S., 1986: Kinematics of the sea ice. / In: The Geophysics of Sea Ice. -Plenum, New York, P.489-549
2. Maykut, G. A. Large scale heat exchange and ice production in the Central Arctic. J. Geophys. Res., 1982, 87 (C10): 7971–7984.
3. Степанов В.В. Очерки спутниковой синоптической метеорологии. СПб.:Издательство ЛЕМА. 2011. 192 с.
4. Назиров М. Льды и взвеси как гидротермодинамические трассеры по данным космических многозональных съемок/Под редакцией чл.-кор. АН СССР В. В. Богородского Л.:Гидрометеиздат 1982. 161 с.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГОЛЬФСТРИМА С ПОМОЩЬЮ
ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И
АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Дианский Н.А.^{1,2,3}, Жмур В.В.⁴, Гусев А.В.^{2,3,4}

¹ *Московский государственный университет имени М.В.
Ломоносова,*

119991, Москва, Ленинские горы, 1, 8(495)939-10-00,

² *Институт вычислительной математики
имени Г.И. Марчука РАН*

119333, Москва, ул. Губкина, 8, 8(495)984-81-20

³ *Государственный океанографический институт
имени Н.Н. Зубова, Росгидромет,
119034, Москва, Кропоткинский пер., бс1, 8(499)246-72-88*

⁴ *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01,
nikolay.diansky@gmail.com*

**INVESTIGATION OF GULF STREAM DYNAMICS WITH EDDY-
RESOLVING NUMERICAL MODELLING AND ANALITICAL METHOD**

Diansky N.A.^{1,2,3}, Zhmur V.V.⁴, Gusev A.V.^{2,3,4}

¹ *Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991*

² *Marchuk Institute of Numerical Mathematic of Russian Academy of Sciences,
8, Gubkina str, Moscow, 119333*

³ *Zubov State Oceanographic Institute, Roshydromet,
6bld1, Kropotkinsy lane, Moscow, 119034*

⁴ *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

Представлены результаты расчётов циркуляции Северной Атлантики с высоким пространственным разрешением по методу диагност-адаптация. Показана интенсификация Гольфстрима с увеличением его скорости и уменьшением ширины и обоснование этого переходом доступной потенциальной энергии в кинетическую.

The results of North Atlantic numerical simulation in eddy-resolving mode by using “diagnosis-adaptation” method are presented. The Gulf Stream intensification with increasing its velocity and a decreasing in its width are shown, and this is substantiated by the transition of the available potential energy into kinetic energy.

В работе представлены результаты численных расчётов по воспроизведению циркуляции Северной Атлантики с высоким пространственным разрешением. Для расчётов используется хорошо себя зарекомендовавшая модель океанической и морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) [1,2].

Пространственное разрешение модели составляет $1/16^\circ$ по долготе и $1/20^\circ$ по широте. Расчётная область расположена в границах от 98° з.д. до 36° в.д. по долготе и от 10° ю.ш. до 78° с.ш. по широте. Расчёты проведены по методу А.С. Саркисяна «диагноз-адаптация» [3]. Сначала в режиме диагноза был проведён расчёт динамики на 30 суток при фиксированных среднеянварских полях температуры и солёности, взятых из электронного атласа WOA18 [4]. Затем в режиме адаптации, стартуя с полей, полученных по результатам диагноза и используя атмосферное воздействие из базы JRA55-do [5], был проведён расчёт полной гидротермодинамики океана на 365 суток.

На рис. 1 приведена карта горизонтальной скорости течений в районе Гольфстрима на глубине 50 м за моменты времени 1 и 80 суток после начала расчёта на этапе адаптации. Видно, что на начальном этапе Гольфстрим имеет большую ширину и низкие скорости течений, а по истечении около 3 месяцев его ширина уменьшается, а скорость течений в ядре увеличивается. На рисунке 2 приведены вертикальные разрезы по плоскости 70° з.д. зональной скорости течений и потенциальной плотности за те же моменты времени. Помимо вышеописанных изменений характеристик струи Гольфстрима, на данном рисунке можно наблюдать и изменение структуры плотности, которая сначала имеет относительно пологую структуру, а затем в районе струи происходит обострение плотностного фронта. Таким образом, продемонстрирован процесс интенсификации Гольфстрима, при котором наблюдается увеличение скорости его ядра примерно от 0,7 до более чем 1,5 м/с, а уменьшение ширины – примерно от 300 до 100 км. Кроме того, в динамике Гольфстрима проявляется интенсивное меандрирование с сопровождающим его вихреобразованием.

Для теоретического исследования процесса интенсификации Гольфстрима построена упрощённая математическая модель в

приближении двухслойного океана. В рамках этой модели построен баланс плотности полной энергии. Показано, что минимум плотности энергии достигается при ширине струи равной $(3/2)^{1/2}$ от первого бароклинного радиуса деформации Россби, что составляет приблизительно 60-80 км, а скорость в её ядре достигает значений около 2.5 м/с. При этом интенсификация Гольфстрима сопровождается увеличением его кинетической энергии, а источником этого увеличения служит доступная потенциальная энергия.

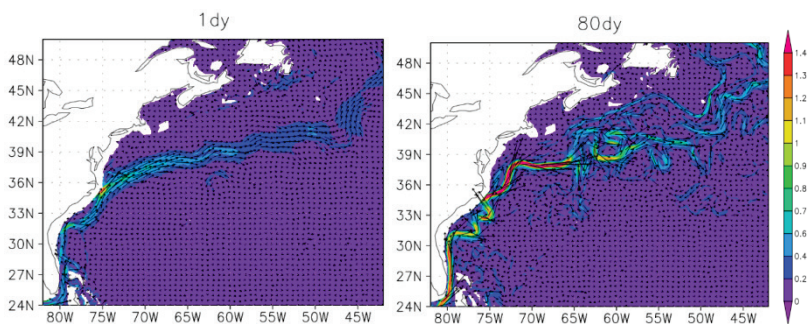


Рис. 1. Горизонтальная скорость течений в районе Гольфстрима на глубине 50 м, м/с. Стрелками показаны векторы скорости, заливкой – величина скорости. Слева – по истечению 1 суток модельного времени, справа – по истечению 80 суток.

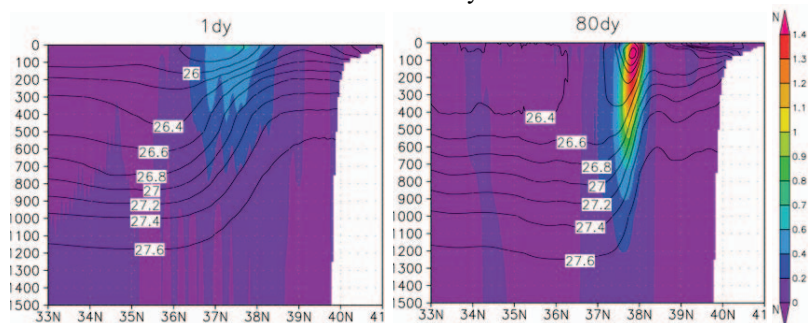


Рис. 2. Вертикальный разрез по плоскости 70° з.д. зональной скорости течений, м/с (заливка) и потенциальной плотности, отклонения от 1000 кг/м^3 (изолинии). Слева – по истечению 1 суток модельного времени, справа – по истечению 80 суток.

Таким образом, вихререзающие модели, выполняющие закон сохранения механической энергии, способны реалистично описывать меандрирование Гольфстрима и образование вихрей вокруг него. Однако, универсального рецепта для адекватного описания Гольфстрима нет. Кроме того, модельное решение очень чувствительно к модельным параметризациям физических процессов. По опыту, для адекватного описания точки отрыва Гольфстрима от берега необходим пространственный шаг сетки по горизонтали не менее $1/10^\circ$. Кроме того, важно также воспроизведение Лабрадорского течения, которое играет важную роль в формировании структуры Гольфстрима за счёт так называемого его «отжима» от материка. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 22-17-00267.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дианский, Н. А. Моделирование циркуляции океана и исследование его реакции на короткопериодные и долгопериодные атмосферные воздействия / Н. А. Дианский - М. : Физматлит, 2013. - 272 с.
2. Moshonkin, S., Zalesny, V., Gusev, A. Simulation of the Arctic – North Atlantic Ocean Circulation with a Two-Equation K-Omega Turbulence Parameterization / S. Moshonkin, V. Zalesny, A. Gusev // J. Mar. Sci. Eng. - 2018. - V.6. - №10. - Paper №95.
3. Демин, Ю. Л., Ибраев, Р. А., Саркисян, А. С. Калибрация моделей циркуляции и воспроизведения климата Мирового океана / Ю. Л. Демин, Р. А. Ибраев, А. С. Саркисян // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. - 1991.- Т. 27. - № 10. - С. 1054-1067.
4. Boyer, T. P. World Ocean Atlas 2018 / T. P. Boyer, H. E. Garcia, R. A. Locarnini et al. 2018. - NOAA National Centers for Environmental Information.
5. Tsujino, H. JRA-55 based surface dataset for driving ocean – sea-ice models (JRA55-do) / H. Tsujino, S. Urakawa, H. Nakano et al. // Ocean Modelling. - 2018. - V.130. - P.79-139

ЧЕТЫРЕХКАНАЛЬНЫЙ ПРОТОЧНЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ ФЛУОРИМЕТР

Глуховец Д.И.^{1,2}, Гольдин Ю.А.¹, Аглова Е.А.^{1,2}, Володин В.Д.¹,
Белевитнев Я.И.¹, Венцкут Ю.И.¹

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,*

Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01;

² *Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, 141701, г. Долгопрудный, 8(495)408-45-54.*

glukhovets@ocean.ru

FOUR-CHANNEL FLOW-THROUGH SPECTRAL FLUOROMETER

Glukhovets D.I.^{1,2}, Goldin Yu.A.¹, Aglova E.A.^{1,2}, Volodin V.D.¹,
Belevitnev Ya.I.¹, Ventskut Yu.I.¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 36,*

Nakhimovsky prospect, Moscow, 117997

² *Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Institutskiy per., 9,
Dolgoprudny, 141701*

Разработан и испытан четырехканальный проточный спектральный флуориметр ПСФ-4, предназначенный для непрерывной регистрации спектров флуоресценции морской воды вдоль маршрута судна. Прибор позволяет исключить взаимное влияние полос флуоресценции и комбинационного рассеяния и выполнять на него нормировку сигнала.

A four-channel flow-through spectral fluorimeter FSF-4, designed for continuous recording of seawater fluorescence spectra along the ship's route, has been developed and tested. The device makes it possible to eliminate the mutual influence of the fluorescence and Raman bands and normalize measured signal to it.

Работающие на ходу судна проточные флуориметры позволяют получать информацию о пространственной изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя морской воды [1]. В течении ряда лет в исследованиях Лаборатории оптики океана ИО РАН использовался двухканальный проточный флуориметр. Эффективность его использования

продемонстрирована в работах [2-3]. В докладе представлены результаты разработки и первых морских испытаний четырехканального проточного спектрального флуориметра ПСФ-4.

ПСФ-4 предназначен для непрерывной регистрации спектров флуоресценции морской воды вдоль маршрута судна (рис. 1). Флуоресценция возбуждается непрерывным излучением трех полупроводниковых лазеров с длинами волн 405, 450 и 532 нм, а также сверхъярким светодиодом с максимумом излучения 595 нм. Спектральная регистрация осуществляется с помощью малогабаритного спектрометра Ocean Insight Flame. Она позволяет полностью исключить взаимное влияние полос флуоресценции и комбинационного рассеяния (КР) на молекулах воды и выполнять нормировку сигнала на КР. Корпус кюветы выполнен с помощью трехмерной печати (PLA-пластик).

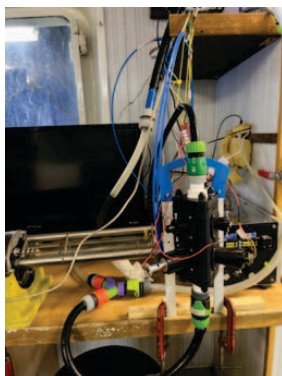


Рис. 1. Проточный четырехканальный спектральный флуориметр ПСФ-4 (на переднем плане) в составе проточного измерительного комплекса ИО РАН, 88-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Использование четырех каналов позволяет разделять вклады различных пигментов фитопланктона и благодаря этому проводить оценку параметров таксономического состава, в частности, регистрировать наличие цианобактерий. Кроме того, данные измерения позволяют получать пространственные распределения концентрации хлорофилла (Хл) и содержания окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ), что полезно для валидации данных спутниковых сканеров цвета.

Отличительной особенностью конструкции макета является использование для четырёх длин волн возбуждения только двух каналов регистрации сигнала флуоресценции и одного спектрометра. Для этого используется оптическая схема, включающая пару Longpass фильтров, раздвоенный входной световод, а также электронная коммутация источников возбуждающего излучения. Такой подход позволяет

существенно снизить стоимость прибора и упростить его работу и обслуживание.

Натурные испытания ПСФ-4 в составе проточного измерительного комплекса ИО РАН проведены в 88-м и 89-м рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в августе-октябре 2022 г. В качестве примера результатов представлены пространственные распределения температуры, солености и интенсивностей флуоресценции Хл и ОРОВ вдоль трека судна, полученные в ходе выполнения 1-го этапа 89-го рейса АМК (рис. 2).

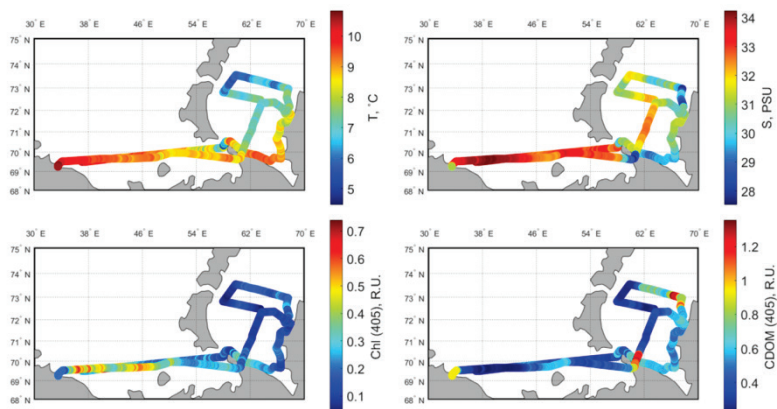


Рис. 2. Пространственные распределения температуры, солености и интенсивностей флуоресценции Хл и ОРОВ вдоль трека судна в 1-м этапе 89-го рейса АМК, 5-17 сентября 2022 г.

На баренцевоморской части маршрута зарегистрированы более высокие значения интенсивности флуоресценции Хл, чем в Карском море. Эта особенность обусловлена цветением кокколитофорид, что подтверждается данными спутниковых сканеров цвета, а также пространственным распределением показателя ослабления морской воды, полученным с использованием проточного прозрачномера (возрастание $c(530)$ до $1,9 \text{ м}^{-1}$, что соответствует концентрации кокколитофорид около 3 млн кл./л). В Карском море зарегистрированы более теплые пресные воды с повышенным содержанием ОРОВ, что обусловлено влиянием речного стока [2].

Получено хорошее согласие с данными двухканального проточного флуориметра, а также с результатами измерений показателя поглощения света морской водой, выполненных с использованием интегрирующей

сферы, и с данными о коэффициенте яркости моря, полученных с помощью палубного спектрорадиометра [4].

В дальнейшем планируется проведение лабораторных калибровок флуориметра на культурах фитопланктона. Анализ результатов этих исследований позволит уточнить существующий метод оценки концентрации хлорофилла по спектрам флуоресценции [5], а также подтвердить эффективность многоканальной флуориметрии.

Разработка прибора выполнена при поддержке гранта МК-4561.2021.1.5, натурные испытания – гранта РФФ № 21-77-10059.

ЛИТЕРАТУРА

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. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface desalinated layer distribution in the Kara Sea determined by shipboard and satellite data // *Oceanologia*. 2020. № 62. № 3. P. 364-373.
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. Павлова М.А., Глуховец Д.И., Дерягин Д.Н., Круглинский И.А. Измерение коэффициента яркости моря с помощью макета палубного спектрорадиометра // *Настоящий сборник*.
5. Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Express method for chlorophyll concentration assessment // *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 2021. Vol. 8.

СПОСОБ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ДИФФУЗИИ В ЧЕРНОМ МОРЕ ПО ТОНКОСТРУКТУРНЫМ ДАННЫМ STD-ЗОНДИРОВАНИЙ

Зацепин А.Г., Подымов О.И., Островский А.Г.

¹ *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-63-92, zatsepin@ocean.ru*

METHOD FOR ESTIMATING THE COEFFICIENT OF VERTICAL
TURBULENT DIFFUSION IN THE BLACK SEA FROM FINE STRUCTURE
CTD-SOUNDING DATA

Zatsepin A.G., Podymov O.I., Ostrovskii A.G.

P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997, 8(499)124-63-92, zatsepin@ocean.ru

Предложен метод оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии на основе данных о тонкой структуре профилей плотности, полученных в результате длительных регулярных измерений в Черном море при помощи зонда-профилографа «Аквалог».

A method for estimating the coefficient of vertical turbulent diffusion is proposed, based on the data of fine structure of density profiles, acquired as long-term series of measurements in the Black Sea by “Aqualog” profiler.

Одной из важных задач физической океанографии является оценка вертикального турбулентного обмена в стратифицированных водах морей и океанов [Munk and Anderson, 1948].

Поскольку прямые расчеты параметров турбулентности по данным микроструктурных измерений весьма затруднительны, оценки коэффициента вертикальной турбулентной диффузии часто основаны на использовании параметризаций и гидрофизических данных с довольно грубым пространственно-временным разрешением. Один из таких подходов был описан Манком и Андерсоном [Munk and Anderson, 1948]. В его основу положена зависимость коэффициента вертикальной

турбулентной диффузии массы K_p от числа Ричардсона Ri в стратифицированном сдвиговом течении:

$$K_p \sim Ri^{-1.5} \quad (1)$$

Здесь $Ri = N^2/Sh^2$, где $N^2 = -(g/\rho)/\partial\rho/\partial z$ — квадрат частоты плавучести, $\partial\rho/\partial z$ — вертикальный градиент плотности, $Sh^2 = (\partial u/\partial z)^2 + (\partial v/\partial z)^2$ — квадрат вертикального сдвига скорости течения, u и v — восточная и северная компоненты скорости соответственно.

Различные модификации формулы (1) впоследствии использовались в различных работах; в частности, для Черного моря подобная зависимость описана в [Podymov et al., 2017]. Ее использование вместе с данными зонда-профилографа Аквалога, выполняющего регулярные одновременные измерения профилей плотности и скорости течения, позволило получить репрезентативные оценки K_p в деятельном слое моря, а также оценить короткопериодную, сезонную и межгодовую изменчивость этого параметра [Podymov et al., 2020].

В данной работе предпринята попытка оценить значения K_p с использованием только тонкоструктурных данных STD-зондирований, полученных Аквалогом в период с ноября 2015 по апрель 2016 г. на континентальном склоне Черного моря. Основанием этому является предположение, что ступенчатая тонкая структура распределения гидрофизических параметров неразрывно связана с процессами вертикального турбулентного перемешивания [Федоров, 1976].

Для анализа используются данные о тонкой структуре профилей плотности, с помощью которых рассчитываются профили тонкоструктурного аналога числа Кокса [Osborn&Cox, 1972]:

$$\langle C(z) \rangle = \frac{\langle (\partial\rho/\partial z)^2 \rangle}{\langle \partial\rho/\partial z \rangle} \quad (2)$$

Здесь $\langle \partial\rho/\partial z \rangle$ — градиент потенциальной плотности, $\langle (\partial\rho/\partial z)^2 \rangle$ — средний градиент, рассчитанный скользящим средним в 25-м окне, $\langle (\partial\rho/\partial z)^2 \rangle - \langle \partial\rho/\partial z \rangle^2$ — флуктуационная часть (пульсации) градиента плотности, рассчитанная, как разница между первичным и усредненным градиентом:

$$\langle C \rangle = 0.2 \cdot (\langle Ri \rangle)^{-1.5} \quad (3)$$

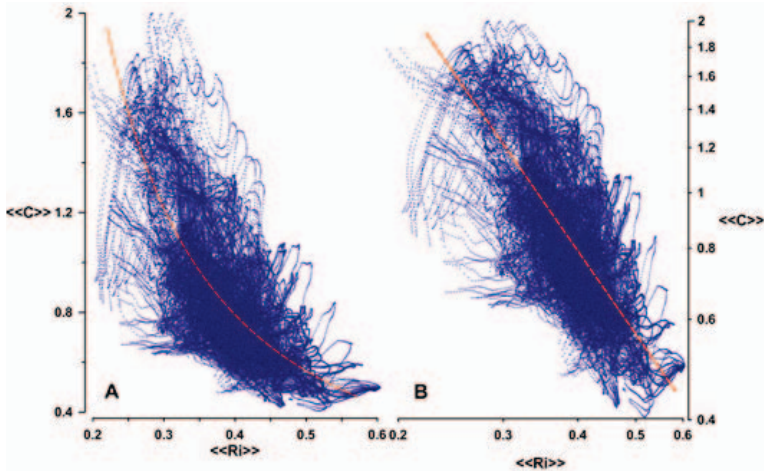


Рис. 1. Диаграмма значений $\langle\langle C \rangle\rangle$ от $\langle\langle Ri \rangle\rangle$ для всех использованных данных. А – распределение в линейных координатах, В – те же данные, но в логарифмических координатах. Пунктиром представлена аппроксимирующая степенная функция (3)

Использованное для анализа число Ричардсона было рассчитано по сглаженным в том же 25-м окне значениям N^2 и Sh^2 , поэтому далее обозначим его как $\langle Ri \rangle$. Помимо вертикального сглаживания, было также использовано сглаживание по времени (5 суток) вдоль изопикнических поверхностей. По результатам двойного сглаживания (обозначим его двумя угловыми скобками) удалось обнаружить, что соответствующие числа Кокса ($\langle\langle C \rangle\rangle$) и Ричардсона ($\langle\langle Ri \rangle\rangle$) связаны между собой степенной функцией (рис. 1):

Схожая функциональная зависимость с тем же показателем степени была обнаружена ранее для Ri и коэффициента вертикального турбулентного обмена K_{\square} : $K_{\square} = 10^{-3} \cdot (1 + 0.2 \cdot Ri)^{-1.5} + 10^{-6}$ [Podymov et al., 2017]. Анализ этих двух параметров показал наличие статистически значимой линейной корреляции между $\langle\langle C \rangle\rangle$ и $\langle\langle K_{\square} \rangle\rangle$ (рис. 2), которую можно использовать для получения оценок K_{\square} на основе данных одних лишь STD-зондирований, выполненных в виде регулярных временных рядов с тонкоструктурным пространственным разрешением.

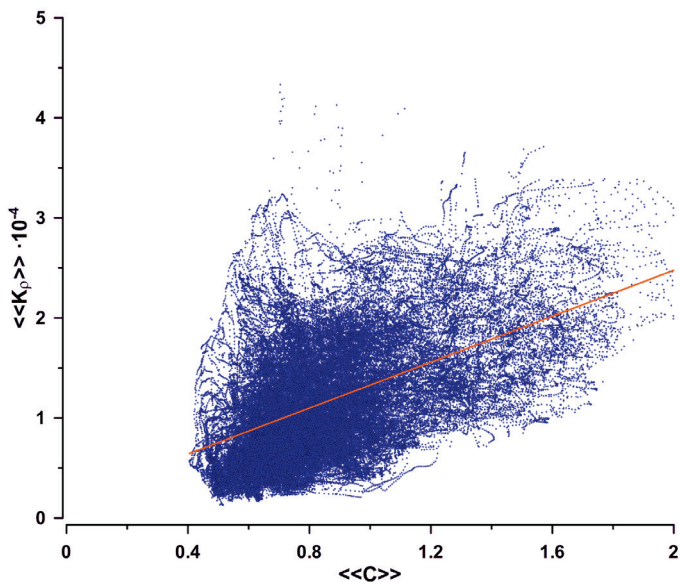


Рис. 2. Значения $\langle\langle K_{\square} \rangle\rangle$ от $\langle\langle C \rangle\rangle$ и линейная аппроксимирующая функция $\langle\langle K_{\square} \rangle\rangle = (1.15 \cdot \langle\langle C \rangle\rangle + 0.18) \cdot 10^{-4}$

Работа выполнена в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Munk, W.H.; Anderson, E.R. Notes on a theory of the thermocline. *J. Mar. Res.* 1948, 7, 276–295
2. Podymov, O.I.; Zatsepin, A.G.; Ostrovsky, A.G. Vertical turbulent exchange in the Black Sea pycnocline and its relation to water dynamics. *Oceanology*. 2017, 57(4), 492–504.
3. Podymov, O.I.; Zatsepin, A.G.; Kubryakov, A.A.; Ostrovskii A.G. Seasonal and interannual variability of vertical turbulent exchange coefficient in the Black Sea pycnocline in 2013–2016 and its relation to variability of mean kinetic energy of surface currents. *Ocean Dyn.* 2020, 70(2), 199–211.
4. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л., Гидрометеоиздат. 1976. 184 с.
5. Osborn, T.R., & C. S. Cox (1972) Oceanic fine structure, *Geophysical Fluid Dynamics*, 3:4, 321-345.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПРИРОДА ТОНКОСТРУКТУРНОГО РАССЛОЕНИЯ ВОД ОКЕАНА

Зацепин А.Г., Герасимов В.В.

¹ *Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Нахимовский пр., 36,
117997, г. Москва, 8(499)124-63-92, zatsepin@ocean.ru*

PHYSICAL NATURE OF THE FINE-STRUCTURED LAYING OF OCEAN WATER

Zatsepin A.G., Gerasimov V.V.

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997, 8(499)124-63-92, zatsepin@ocean.ru*

В лабораторном эксперименте с однородным по вертикали турбулентным перемешиванием изначально непрерывно стратифицированной по солености водной среды подтвержден механизм Филлипса-Посментьера тонкоструктурного расслоения океанского пикноклина.

In laboratory experiment with vertically homogeneous turbulent mixing of initially continuously salinity stratified aquatic media, the Phillips-Posmentier mechanism of fine scale layering of ocean pycnocline is confirmed.

В своей книге [1] К.Н. Федоров писал: «С помощью высокочувствительных зондирующих приборов установлено, что профили вертикального распределения температуры, солености, плотности и их вертикальных градиентов в океане обладают большим количеством тонких структурных деталей...можно говорить, прежде всего, о сравнительно устойчивой во времени тонкослойной стратификации океана, в которой квазиоднородные слои перемежаются более тонкими прослойками со скачками термодинамических параметров». Хотя открытие тонкослойной стратификации вод океана произошло уже более полувека назад, физическая природа этого явления до сих пор являются предметом дискуссии.

На наш взгляд, наиболее общий механизм тонкоструктурного расслоения стратифицированной водной среды, подверженной турбулентному воздействию, был предложен Филлипсом [2] и Посментьером [3]. Суть этого механизма заключается в том, что в условиях сильной плотностной стратификации водной среды вертикальный турбулентный обмен уменьшается с увеличением градиента плотности. Физически, это обусловлено подавлением турбулентности силами плавучести. При этом поток массы уменьшается в области увеличения градиента плотности, благодаря чему этот градиент возрастает еще. В то же время, в области уменьшения градиента плотности поток массы увеличивается, благодаря чему градиент продолжает уменьшаться. В результате формируется водная среда, в которой квазиоднородные слои разделяются скачками плотности. Масштаб слоев определяется соотношением между кинетической энергией турбулентности и потенциальной энергией стратификации.

Эффект расслоения водной среды под воздействием однородного по вертикали турбулентного перемешивания был неоднократно продемонстрирован в лабораторных и численных экспериментах (см. [4]). Однако связь расслоения с отрицательной зависимостью вертикального турбулентного обмена от градиента плотности при этом не изучалась. Поэтому образование тонкой структуры под действием механизма Филиппса-Посментьера не было однозначно подтверждено.

В [4] исследовался процесс турбулентного массообмена через границу раздела между слоями различной солености. При этом безразмерная скорость массообмена определялась как функция числа Ричардсона (Ri), пропорционального перепаду плотности между слоями. Оказалось, что граница раздела поддерживается в обостренном состоянии при $Ri > Ri^*$, когда безразмерная скорость вовлечения пропорциональна Ri^{-n} , где $n > 1$, и расширяется за счет турбулентной диффузии при $Ri < Ri^*$, когда $n < 1$. Полученный результат косвенно подтвердил реализацию механизма Филиппса-Посментьера.

В данной работе, связь потока массы по вертикали с эффектом тонкослойного расслоения изначально линейно стратифицированной по солености водной среды, подвергающейся однородному по вертикали турбулентному воздействию, была исследована непосредственно. Турбулентное воздействие осуществляется системой вертикальных стержней, синхронно колеблющихся по горизонтали и проходящих через всю водную толщу. Одновременно с этим, миниатюрным датчиком электропроводности измеряются профили солености. Установлено, что при $Ri > Ri^*$, непрерывная стратификация «разбивается» на квазиоднородные

слои, разделенные плотностными границами. При $Ri < Ri^*$ слоистая система разрушается, и стратификация снова становится квазилинейной (рис.1).

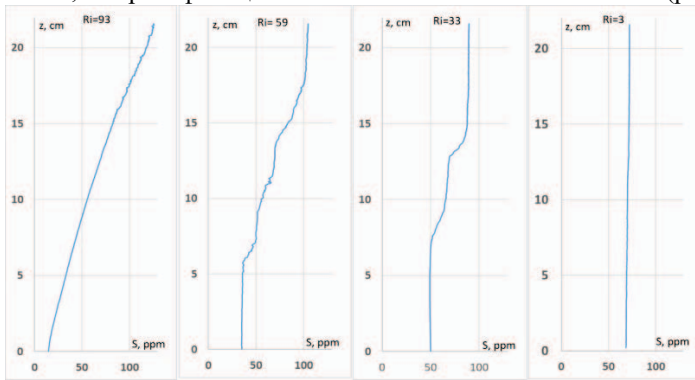


Рис. 1. Последовательные профили солёности в бассейне с изначально квазилинейной стратификацией при перемешивании колеблющимися стержнями. Первый профиль – начальное состояние, второй – стадия расслоения ($Ri > Ri^*$), третий – стадия разрушения слоев ($Ri < Ri^*$), четвертый – квазилинейная стратификация. $Ri^* = 42$.

При $Ri > Ri^*$ вертикальный поток массы Q_p является отрицательной степенной функцией градиента плотности, а при $Ri < Ri^*$ - положительной, в соответствии с механизмом Филлипса – Посментьера (рис. 2).

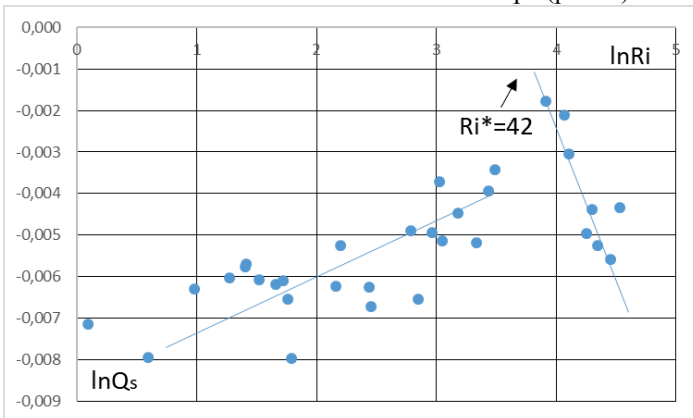


Рис. 2. Вертикальный поток массы Q_p как функция числа Ричардсона Ri в логарифмах. При $Ri > Ri^*$, $Q_p \sim Ri^{-3}$ – стадия формирования слоев. При $Ri < Ri^*$, $Q_p \sim Ri^{2/5}$ – стадия разрушения слоев и восстановления квазилинейной стратификации.

Поскольку в океанском пикноклине коэффициент вертикального массообмена $K \sim Ri^{-n}$, где $n \approx 1.5$ [5], то его тонкоструктурное расслоение является вполне закономерным.

Работа выполнена в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федоров К.Н. Тонкая термохалинная структура вод океана. Л., Гидрометеиздат. 1976. 184 с.
2. Phillips, O. M. Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? // Deep Sea Res. Oceanogr. Abstr. 1972, 19, 7-81.
3. Posmentier, E. S. The generation of salinity fine structure by vertical diffusion // J. Phys. Oceanogr. 1977, 7, 298-300.
4. Zatsepin, A.G.; Gerasimov, V.V.; Ostrovskii, A.G. Laboratory study of turbulent mass exchange in a stratified fluid. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(6), 756.
5. Forryan, A.; Martin, A.; Srokosz, M.; Popova, E.; Painter, C.; Renner, A. A new observationally motivated Richardson number based mixing parameterization for oceanic mesoscale flow. J. Geophys. Res.: Oceans. 2013, 118, 3, 1405-1419.

ГЕОЛОГИЯ, ГЕОФИЗИКА, РЕСУРСЫ.

УДК 551.4.012 +551.4.013

О МЕТОДЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ НА ПРИМЕРЕ АЗИАТСКО- ТИХООКЕАНСКОГО СОЧЛЕНЕНИЯ

Мельниченко Ю.И., Лепешко В.В., Ли Н.С.

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН,
ул. Балтийская, 43 690041, г. Владивосток, +7(423) 231-1400
yumel@poi.dvo.ru*

METHOD OF STATISTICAL ANALYSIS OF RELIEF AND GEOPHYSICAL DATA ON THE EXAMPLE OF THE ASIA-PACIFIC JUNCTION

Melnichenko Y.I., Lepeshko V.V., Lee N.S.

Plyichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS,

Проведены статистические исследования данных спутниковой альтиметрии. Выделены парагенезы структурных форм рельефа земной поверхности и геофизических полей, которые интерпретируются как результаты деформаций земной коры.

Statistical studies were carried out according to satellite altimetry data. The parageneses of structural landforms of the earth's surface and geophysical fields are distinguished. They are interpreted as the results of deformations of the earth's crust.

Цель проводимых работ – изучение геодинамики сочленения Азии и северо-западной окраины Тихого океана. Показан один из методов изучения – парагенетический анализ спутниковых альтиметрических данных. Рассмотрены некоторые его возможности и варианты интерпретации. Решалась задача: по структурным рисункам карт рельефа, гравиметрических полей и геологических выявить взаимосвязанные черты тектонического развития земной коры в регионе.

Поскольку земная поверхность по определению принадлежит её объёму, то эволюция тектоносферы закономерно отражается в строении её поверхности. Извлечь информацию о событиях эволюции можно по

«следам», оставленным ими в геологическом строении и рельефе. Такие «следы» – особенности строения, порождённые особенностями развития, – называют парагенезами структур или структурными парагенезами. Парагенезы изучаются по их графическим отображениям – структурным рисункам.

Для получения конечного результата – карт и схем геолого-исторической и геодинамической специализации потребовалась следующая последовательность действий. 1. Массивы цифровых данных сайта «ЕТОРО1» (http://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi) преобразованы в карты рельефа и геофизических полей, а также системы профилей. 2. Проведены статистический и парагенетический анализы структурных рисунков карт, и выявлены структурные парагенезы. 3. Для уточнения генезиса структурных парагенезов и их ассоциаций проведён сравнительный анализ полученных материалов с другими геологическими и геофизическими картами. 4. Сделаны обобщения и проведены интерпретации результатов анализов.

Карты строились в изолиниях и 3d вариантах, с различными направлениями «освещения». Фактор освещения влияет на прорисовку структур разного простирания, поскольку отчётливей видны структуры, ориентированные поперёк направления света. Статистическая обработка данных акцентировалась на выявление тенденций развития коры, проявленных в структурных рисунках карт. Для этого параметры распределений каждого из статистических показателей (средние значения, экстремальные, квадратичные отклонения и др.) усреднялись на трапецию, размером 1x1 градус.

По закономерностям сходства и различия строения рельефа, и полей гравитационных аномалий выявлены участки земной коры – структурные парагенезы, различающиеся динамикой формирования. Определены ассоциации структурных парагенезов форм поверхности, кайнозойских и докайнозойских тектонических образований. В силу закономерного сходства форм и элементов структур рельефа в плане с полями геофизических аномалий ассоциации интерпретированы как результат последовательных трансрегиональных и локальных тектонических деформаций. Построены схемы ассоциаций структурных парагенезов, выявленных по сходству и особенностям строения структурных рисунков карт рельефа, геологической, и гравиметрических в редукциях Фая и Буге. Приводится вариант интерпретации результатов анализа как последовательность тектонических событий, формировавших крупные структуры земной коры в регионе в квартере (рис.).

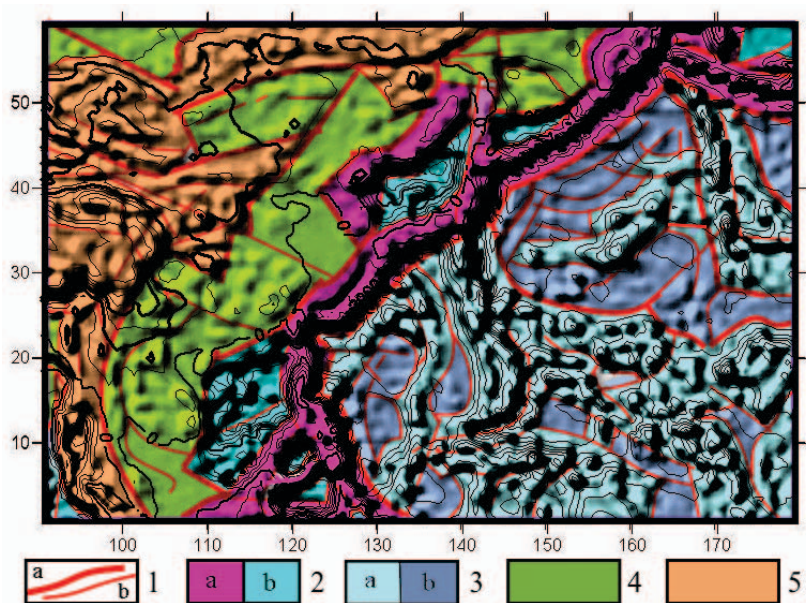


Рис.1 Ассоциации структурных парагенезов эволюции земной коры (квартер) в зоне Азиатско-Тихоокеанском сочленении «континент-океан».

1 - Границы ассоциаций: а – крупнейших, б – прочих. Ассоциации структурных парагенезов: 2 – деформаций общего поперечного сжатия в переходной зоне: а – сконцентрированных, б – рассредоточенных, 3 – деформаций океанической коры: а – с общим утолщением и вулканической активностью, б – с преобладанием аккумулятивного выравнивания, 4 – процессов выравнивания рельефа, 5 – унаследованное складкообразование.

В современном рельефе причинно-следственные связи эволюции отражены группами признаков. Среди них: реликты прежнего строения (1), признаки процессов, изменявших его (2), эволюционные тенденции новейшего рельефа и их кинематическая связность (3). Основные показатели геодинамического контроля при формировании структур рельефа: концентрации форм, их размеры и ориентировки. Широкие поля деформаций разделяются узкими зонами. В структуре и тех и других можно выделить (при оптимальном увеличении) признаки последовательности образования и изменений слагающих форм. Это оси, границы и их взаимоотношения. По расположениям границ и структурных элементов, различаются четыре основных типа взаимоотношений

парагенезов (структурных рисунков): отсечённые, сопряжённые, наложения и пересечённые. Из них вычленяются два крайних типа: отсекаемые со всех сторон, и отсекающие на всём своём протяжении. Первый тип, как правило, многоугольник, второй протяжённая линия, узкая зона. Оба отражают тенденции развития деформаций в их границах. Многоугольник формируется как структура обособленная за счет менее активного развития деформаций в нём, чем за его пределами. Он может быть ограничен полями с высокой концентрацией деформаций, как, например, впадины Японского и Филиппинского морей, или иметь не резкие или различные по контрасту участки границ, как котловины Тихого океана.

Взаимосвязанные черты разнородных структурных рисунков указывают на пространственно-временные и причинно-следственные связи событий, сформировавших соответственные парагенезы структур. Некоторые различия как, правило, закономерны. Например, геофизические поля «помнят» и то, что слабо выражено в рельефе. Тенденции формирования структурных неоднородностей земной коры обусловлены достаточной интенсивностью, продолжительностью и направленностью региональных и глобальных геодинамических процессов. На протяжении кайнозоя региональные деформации изменяли направленность и интенсивность, что отразилось в рельефе и полях геофизических аномалий.

Парагенетический анализ структурных рисунков карт, построенных по альтиметрическим данным, применим при решении разнообразных теоретических и прикладных задач, связанных с геодинамикой земной коры.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МАГНИТУД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ ДОННЫХ СЕЙСМОГРАФОВ

Ковачев С.А., Крылов А.А., Егоров А.В.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский пр. 36
+7 (916) 235 4029, kovachev@ocean.ru*

DETERMINATION OF EARTHQUAKE MAGNITUDES BASED ON THE RECORDS OF BOTTOM SEISMOGRAPHS

Kovachev S.A., Krylov A.A., Egorov A.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nahimovsky Prospect, Moscow, Russia, 117997*

В настоящей работе приводятся результаты верификации магнитудного соотношения, основанного на длительности записи сейсмического сигнала. Верификация была выполнена в результате ряда экспериментов с донными сейсмографами и с привлечением данных наземных сейсмических станций.

In this paper, we present the results of the verification of the magnitude ratio based on the duration of the seismic signal recording. Verification was carried out as a result of a series of experiments with bottom seismographs and using data from land seismic stations.

Определение магнитуд землетрясений, записанных донными сейсмографами с использованием традиционных методов, т.е. замерам отношений A_{max} к t_{max} , где A_{max} - амплитуда максимальной фазы, а t_{max} - ее период, вызывает затруднения, т.к. практически повсеместно отсутствуют калибровочные кривые, описывающие затухание сейсмических волн с расстоянием для акваторий. Кроме того, при применении донных сейсмографов для расчета магнитуды, как правило, используются записи гидрофонного канала, где отношение «сигнал-шум» более высокое, чем на записях сейсмометрических каналов донных сейсмических станций. Определение амплитуд сейсмического сигнала на сейсмометрических каналах донных сейсмографов также затруднено из-за искажений,

привносимых в запись наличием рыхлого обводненного слоя донных осадков.

Для расчета магнитуд землетрясений зачастую используется длительность записи сигналов (τ). Магнитуда вычисляется с помощью соотношения между M_D и τ , представленного в виде:

$$M_D = 3.24 \lg \tau - 3.84, \quad (1)$$

где τ - длительность коды сигнала землетрясения в с, т.е. время между приходом первого вступления продольной волны и моментом, когда амплитуда коды не более чем в 1.5 раз превышает амплитуду фонового сейсмического шума. Это соотношение было получено в результате серии экспериментов с донными сейсмографами в районе о. Крит в Эгейском море [1] и апробировано в Тирренском море [2] с помощью донных сейсмографов из работы [3]. Кроме того, формулу, полученную, на основе таблицы «Соловьева-Ковачева», многие исследователи (Б.В. Левин, Е.В. Сасорова, А.С. Борисов и др.) использовали при определении магнитуд микроземлетрясений в нескольких сериях гидроакустических измерений. По мере получения записей землетрясений, зарегистрированных как донными, так и наземными сейсмографами (Каспийское море [4,5,6], Курильская островная дуга [7], Балтийское море [8], Черное море [9], Южный Мангышлак [10]) появилась возможность верифицировать соотношение (1).

В результате донных сейсмологических наблюдений 2004 и 2006 гг. в акватории Среднего Каспия были получены записи 12 местных землетрясений, одновременно записанными донными и наземными сейсмическими станциями. Магнитуды и энергетические классы этих землетрясений указаны в бюллетенях Дагестанской сети наземных сейсмических станций. По записям донных сейсмографов была определена длительность землетрясения τ этих сейсмических событий и сопоставлена с величиной M_L (локальная магнитуда по Рихтеру), которая пересчитывалась из значений энергетического класса, указанных в бюллетене сейсмических станций Дагестана с помощью соотношения Т.Г. Раутиан. Для пересчета M_S , M_b , M_w в M_L (M_D) использовались соотношения А.А. Гусева.

Аналогичные исследования были выполнены по данным, полученным в районе Курильских островов (4 землетрясения), в Балтийском море (2 землетрясения), в Черном море (1 землетрясение) и в Южной части п-ова Мангышлак (5 землетрясений). При этом использовались данные Геофизической службы РАН и Геологической службы США. В этих экспериментах магнитуды всех совместно записанных землетрясений превышали величину $M_D=2.5$, поскольку в доступных каталогах землетрясений данные о сейсмических сигналах с $M < 2.5$ отсутствуют. Для меньших магнитуд были использованы записи

пневмоисточников, полученные в результате работ по глубинному сейсмическому зондированию [11]. Информация об упругой энергии, излучаемо пневмоисточниками объемом 30 и 10 л приводится в работе [12]. Пересчет этих значений в магнитуды дает следующие величины $M_D=1.46$ и 1.26 соответственно.

Уточненное магнитудное соотношение показано на рис. 1. В аналитической форме оно имеет вид:

$$M_L = (3.23 \pm 0.16) \lg(\tau) - (3.74 \pm 0.31) \quad (2)$$

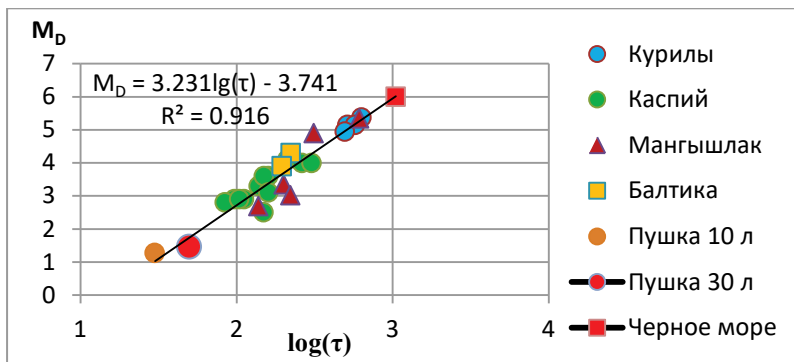


Рис. 1 Зависимость магнитуды землетрясений от длительности сигнала

Таким образом, новое соотношение в пределах ошибок совпадает с соотношением, полученным для землетрясений Эгейского моря (1). Его коэффициенты близки к аналогичным коэффициентам в соотношениях других авторов [1].

Работа выполнена по Государственному заданию № FMWE-2021-0004 и Гранту Президента РФ № МК-45.2022.1.5.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ковачёв С.А., Соловьёв С. Л. Об определении локальной магнитуды местных землетрясений по наблюдениям донных сейсмографов // Физика Земли. – 1996. – № 5. – С. 26-30.
2. Solov'ev S.L., Ferri M., Kuzin I.P., Kovachev S.A. Seismicity of earth crust of south-east part of Tyrrhenian sea, (from the results of bottom and ground seismic observations) // Доклады Академии наук СССР. — 1989. – Т. 305. № 6. – С. 1339.
3. Соловьёв С.Л., Контарь Е.А., Дозоров Т.А., Ковачев С.А. Глубоководная донная самовсплывающая сейсмологическая станция АДС-8 // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 9. – С. 75.

4. Ковачев С.А., Казьмин В.Г., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Новые данные по сейсмичности Среднего Каспия и их возможная тектоническая интерпретация // Геотектоника. – 2006. – № 5 – С. 50-60.
5. Ковачев С.А., Казьмин В.Г., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Новые данные о мантийной сейсмичности каспийского региона и их геологическая интерпретация // Геотектоника. – 2009. – № 3. – С. 30-44.
6. Лобковский Л.И., Мерклин Л.Р., Ковачев С.А. и др. Основные направления и предварительные результаты исследований на научно-исследовательском судне "Рифт" в Каспийском море (апрель-май 2006 г.) // Океанология. – 2007. – Т. 47, № 5.– С. 795-800.
7. Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Морские сейсмологические наблюдения в районе Центральных Курил перед катастрофическими землетрясениями в ноябре 2006 г. (M = 8.3) и январе 2007 г. (M = 8.1) // Физика Земли. – 2009. – № 9. – С. 48-65.
8. Ковачев С.А. Результаты сейсмологических наблюдений на западе Калининградской области и на акватории Балтийского моря // Физика Земли. – 2008. – № 9. – С. 20-31.
9. Ковачев С.А., Крылов А.А., Миронюк С.Г. Оценка сейсмической опасности вдоль трассы газопровода в российском секторе Черного моря с помощью донных сейсмологических наблюдений // В книге: Инженерная и рудная геофизика. – 2021. Материалы 17-й научно-практической конференции и выставки. Москва, 2021. – С. 103.
10. Лобковский Л.И., Ковачев С.А. и др. Сейсмологический мониторинг Южно-Мангистауского региона нефтедобычи Западного Казахстана // Нефть и Газ. – 2011. – № 2. – С. 21.
11. Гринько Б.Н., Ковачев С.А., Хортов А.В. Строение вала Шатского (Черное море) по результатам региональных сейсмических исследований // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2004. – Т. 79, № 3. – С. 3-7.
12. Гуленко В.И., Карпенко В.Д., Шлыков В.А. Теоретическое и экспериментальное исследование динамических и акустических характеристик пневматических излучателей для морской сейсморазведки // Технология и методика применения источников упругих волн приморских сейсмоакустических исследованиях. Геленджик. – 1988. – С. 13-30.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ ПАЛЕОЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Ковачев С.А., Либина Н.В., Мутовкин А.Д.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский пр. 36
+7 (916) 2354029, kovachev@ocean.ru*

SEISMIC HAZARD OF THE PECHORA SEA IN CONSIDERATION OF PALEO-EARTHQUAKES

Kovachev S.A., Libina N.V.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences
36, Nahimovsky Prospect, Moscow, Russia, 117997*

По данным сейсмоакустических исследований в Печорском море была обнаружена палеосейсмодислокация, приуроченная к разломной зоне, трассирующей Североуральский сейсмический линеймент. Это позволило оценить магнитуду древнего землетрясения, которое произошло в пределах Североуральского линеймента, и пересмотреть оценки сейсмических воздействий на морские нефтегазовые сооружения в Печорском море.

According to seismoacoustic studies, a paleoseismodislocation was found in the Pechora Sea, confined to a fault zone tracing the North Ural seismic lineament. This made it possible to estimate the magnitude of the ancient earthquake that occurred within the North Ural lineament and to revise the estimates of seismic impacts on offshore oil and gas facilities in Pechora Sea.

Методики и виды морских сейсмических исследований, необходимые для оценки сейсмической опасности морских сооружений, изложены в работах [1-6]. Использование других методов, в частности, непрерывного сейсмического профилирования (НСП) позволяет выполнять уточнение исходной сейсмичности в акваториях на существенно более высоком уровне. Это связано с возможностью обнаруживать

сейсмодислокаций (разрывы границ в слоях донных четвертичных отложений), связанных с древними землетрясениями.

На профиле НСП, которой был выполнен в экспедиции на НИС «Академик Борис Петров» в 2022 году в Печорское море, выделяется дислокация (возможно, палеосейсмодислокация в соответствии с [7]) на временах 84 – 86 мс, что соответствует глубине порядка 63 м от поверхности моря и порядка 15 м от морского дна (рис. 1). Эта палеосейсмодислокация представлена в виде ступеньки (разлома), смещающей границу между слоями осадочных пород в четвертичных отложениях на величину порядка 5 м.

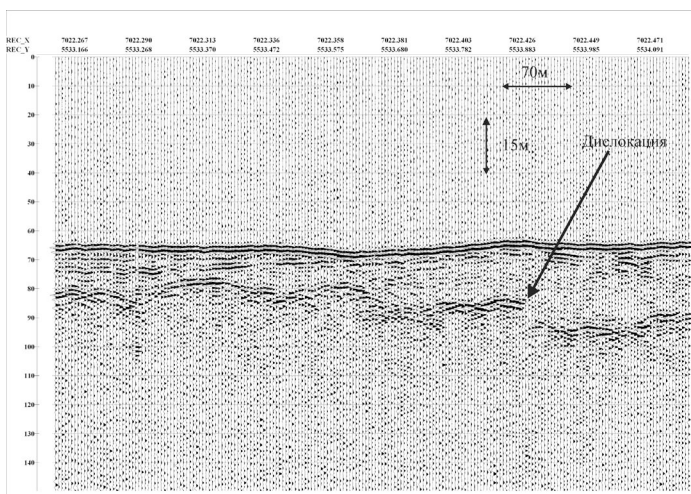


Рис. 1. Сейсмический разрез по профилю НСП, на котором выделяется палеосейсмодислокация, нарушающая кровлю слоя четвертичных осадков под дном Печорского моря (Дислокация).

Положение сейсмодислокации в плане показано на рис. 2.

Если использовать соотношение из работы [8]

$$M=6.93 + 0.82lgD, \quad (1)$$

где D – смещение по разрыву в метрах, получаем значение магнитуды древнего землетрясения $M=7.5$, т.е. значение магнитуды, существенно превышающее $M=5$ из работы [9].

Таким образом, сделанные в работе [9] оценки величин сейсмических воздействий для нефтегазовых объектов Печорского моря необходимо пересмотреть, учитывая новые данные о максимальных землетрясениях,

происходивших в древности в исследуемом районе. Для некоторых объектов в Печорском море амплитуды сейсмических воздействий могут достигать 9 баллов.

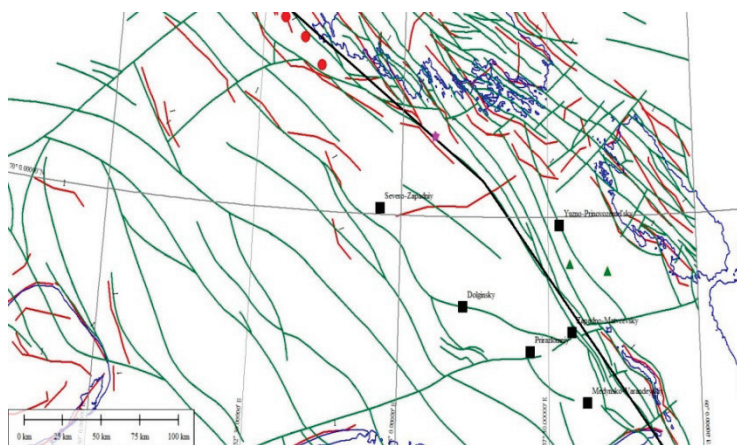


Рис.2. Положение разломов северо-восточного шельфа Печорского моря. Красные кружки – эпицентры землетрясений по данным ГС США. Черные квадратики – нефтегазовые месторождения.

Зеленые линии – разломы по данным ГИН РАН. Красные линии – разломы по данным линеаментного анализа. Черная линия – Североуральский линеамент. Сиреневая звездочка – положение обнаруженной палеосейсмодислокации

Кроме того, основной вывод, который необходимо сделать по результатам настоящей работы, сводится к следующему предложению. В программу морских инженерных изысканий необходимо дополнить сейсмическими исследованиями в радиусе 50 – 100 км от изучаемых площадок, отведенных под строительство морских сооружений.

Эти работы необходимо выполнять в районах акватории, где предполагается наличие активных разломов в земной коре. Работы по сейсмическому профилированию высокого разрешения должны быть, прежде всего, нацелены на поиск палеосейсмодислокаций (смещений границ между слоями четвертичных осадков). Подобные работы выполняются на суше и носят название трэнчинг (рытье длинных и глубоких канав, и поиск на их стенках смещений границ между слоями грунта). На суше это весьма дорогой и трудоемкий метод.

Работа выполнена по Государственному заданию № FMWE-2021-0004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гринько Б.Н., Ковачев С.А., Хортов А.В.Строение вала Шатского (Черное море) по результатам региональных сейсмических исследований// Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2004. – Т. 79, № 3. – С. 3-7.
2. Ковачёв С.А., Соловьёв С. Л. Об определении локальной магнитуды местных землетрясений по наблюдениям донных сейсмографов // Физика Земли. – 1996. – № 5. – С. 26-30.
3. Ковачев С.А., Кузин И.П., Лобковский Л.И. Морские сейсмологические наблюдения в районе Центральных Курил перед катастрофическими землетрясениями в ноябре 2006 г. (M = 8.3) и январе 2007 г. (M = 8.1) // Физика Земли. – 2009. – № 9. – С. 48-65.
4. Лобковский Л.И., Мерклин Л.Р., Ковачев С.А. и др. Основные направления и предварительные результаты исследований на научно-исследовательском судне "Рифт" в Каспийском море (апрель-май 2006 г.) // Океанология. – 2007. – Т. 47, № 5.– С. 795-800.
5. Соловьёв С.Л., Контарь Е.А., Дозоров Т.А., Ковачев С.А. Глубоководная донная самовсплывающая сейсмологическая станция АДС-8 // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1988. – № 9. – С. 75.
6. Solov'ev S.L., Ferri M., Kuzin I.P., Kovachev S.A. Seismicity of earth crust of south-east part of Tyrrhenian sea, (from the results of bottom and ground seismic observations) // Доклады Академиинаук СССР. — 1989. – Т. 305. № 6. –С. 1339.
7. Солоненко В.П. Землетрясения и рельеф // Геоморфология. – 1973. – №4. – С. 3-13.
8. Мак-Калпин Д.П. Применение палеосейсмологических данных при оценке сейсмической опасности и неотектонических исследованиях // Палеосейсмология. Том 2. Под редакцией Д.П.Мак-Каплина. М.: Научный мир, – 2011. – С. 237-378.
9. Миронюк С.Г., Ковачев С.А., Горбачев С.В., 2021. Нормативные требования к оценке исходной сейсмичности на шельфе Печорского моря и опыт ее уточнения детерминистским методом // Инженерные изыскания, – 202. – Том XV, № 3–4, – С. 42–53, <https://doi.org/10.25296/1997-8650-2021-15-3-4-42-53>.

СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ И ЦУНАМИ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАЦИОНАРНЫХ СТАБИЛИЗИРОВАННЫХ БУЕВ

Левченко Д.Г.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01, levch35@mail.ru*

SYSTEM OF OPERATIONAL CONTROL OF SEISMIC AND TSUNAMI
HAZARD USING STATIONARY STABILIZED BUOYS

Levchenko D.G.

*Shirshov Institute of Oceanology. Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

Большинство сильных цунамигенных землетрясений в регионах Камчатки, Курильских и Японских островов происходит в зоне субдукции на расстоянии от берега в пределах 100 – 200 км. Волна цунами такое расстояние проходит менее чем за 15 – 20 минут, что недостаточно для проведения существенных защитных мероприятий. Предлагается совмещать систему непосредственного обнаружения волн цунами с системой изучения возможных краткосрочных предвестников сильных мелкофокусных землетрясений и располагать подобные обсерватории в районах активных тектонических разломов. Оснащать эти обсерватории сейсмографами с датчиками сильных движений и датчиками сейсмоакустической эмиссии и приборами для измерения параметров придонного слоя воды. В ИОРАН имеется определенный опыт создания и использования подобной аппаратуры. В качестве несущей платформы предлагается использовать стационарные стабилизированные буи изготовленные из напряженного железобетона.

Most strong tsunamigenic earthquakes in the regions of Kamchatka, the Kuril Islands and the Japanese Islands occur in the subduction zone at a distance from the coast within 100–200 km. A tsunami wave travels such a distance in less than 15-20 minutes, which is not enough to carry out

significant protective measures. It is proposed to combine a system for direct detection of tsunami waves with a system for studying possible short-term precursors of strong shallow-focus earthquakes and to locate such observatories in areas of active tectonic faults. Equip these observatories with seismographs with strong motion sensors and seismoacoustic emission sensors and instruments for measuring the parameters of the near-bottom water layer. IORAN has some experience in creating and using such equipment. As a carrier platform, it is proposed to use stationary stabilized buoys made of stressed reinforced concrete.

Основная часть сильных цунамигенных землетрясений в регионах Камчатки, Курильских и Японских островов происходит в зоне субдукции между побережьем и осью глубоководного желоба, с расстоянием очагов от берега в пределах 100 – 200 км. Волна цунами такое расстояние проходит менее чем за 15 – 20 минут, что совершенно недостаточно для эвакуации населения и организации масштабных защитных мероприятий.

Предлагается совмещать систему непосредственного обнаружения волн цунами с системой изучения возможных краткосрочных предвестников сильных мелкофокусных землетрясений и располагать подобные обсерватории в районах активных тектонических разломов. Для обнаружения волн цунами следует использовать хорошо себя зарекомендовавшие кварцевые измерители давления (система DART и др.). Для изучения возможных предвестников землетрясений обсерватории следует оснащать сейсмографами с датчиками сильных движений и датчиками сейсмоакустической эмиссии. Для измерения параметров придонного слоя воды использовать измерители солености, температуры и давления, а также, измеритель прозрачности. В ИОРАН имеется определенный опыт создания и использования подобной аппаратуры. На рис.1 слева представлена кабельная донная сеймостанция разработки ИОРАН, фирмы “Теонод”, ОКБ ОТ РАН. Станция имеет широкополосный канал регистрации сейсмических и гидроакустических сигналов от 0,01 Гц до 20 Гц и специальный канал с полосой от 1 Гц до 500 Гц для регистрации высокочастотных сейсмоакустических сигналов [1, 3].

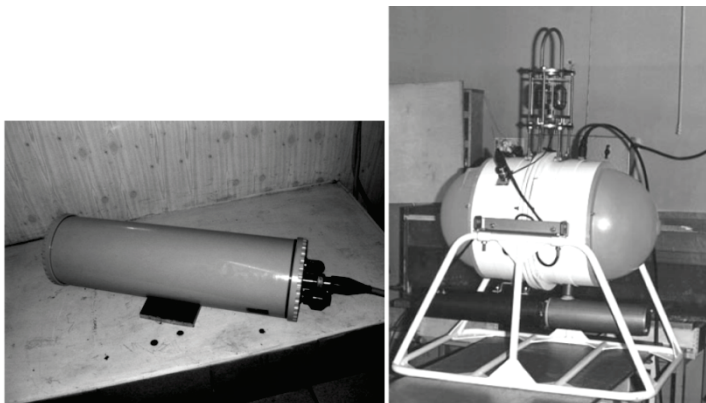


Рис.1. Кабельная донная сейсмостанция ИО РАН (слева). Донная многоцелевая обсерватория ИОРАН (справа).

На рис.1 справа изображена донная обсерватория разработки ИОРАН и ОКБ ОТ РАН. В основу работы обсерватории положены известные явления изменения состава и параметров придонных вод в районе активных тектонических разломов при изменении давления в земной коре. В состав обсерватории входит аппаратура для измерения давления, температуры, скорости и направления течений, скорости звука, электропроводности и прозрачности воды. Оперативная передача данных и команд управления осуществлялась по радиоканалу [2, 3].

В качестве несущей платформы предлагается использовать стационарные стабилизированные буи. Такие буи мало подвержены воздействию ветра и волн, не вращаются, что позволяет соединять их кабелями с донной аппаратурой, могут быть оснащены источниками постоянного питания, измерителями течений, качественными метеостанциями, и другой аппаратурой. Подобные металлические буи для разных целей периодически разрабатывались и использовались в ряде стран (США, Франции, России-ИОРАН). В рассматриваемом случае предлагается использовать буи из напряженного железобетона. Такие буи дешевле и более долговечны, чем металлические, ресурс буя может составлять до 10 – 20 лет. Стоимость в основном определяется оснасткой. На рис.2 представлены схемы стабилизированного буя, разработки ИОРАН [4].

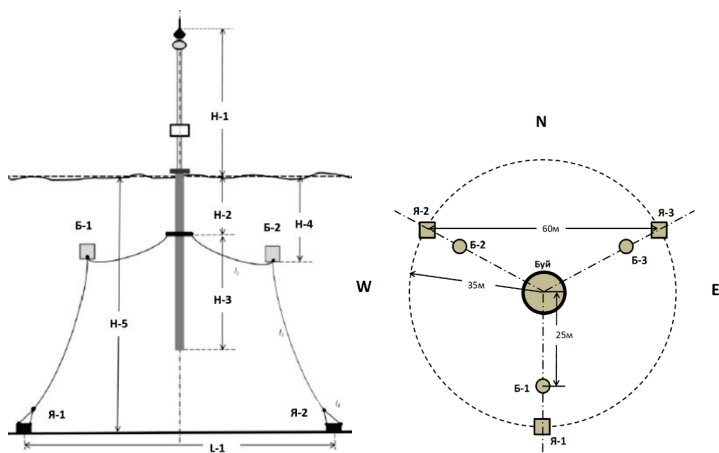


Рис. 2. Схема конструкции стационарного стабилизированного буя (профиль и план). Обозначены: Я-1, Я-2, Я-3 – якоря, Б-1, Б-2, Б-3 притопленные плавучести (бочки), Н-1 – надводная часть буя, Н-2+Н-3 – подводная часть буя, Н-4 – глубина погружения бочек, Н-5 – глубина акватории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Раушенбах И.Б., Леденев В.В., Рогинский К.А. Опыт разработки и испытания комплексной кабельной донной сейсмостанции // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 4. С. 39-51.
2. Гаврилов В.А., Левченко Д.Г., Утяков Л.Л., Шехватов Б.В. Гидрохимическая донная станция для регистрации краткосрочных предвестников морских землетрясений // Океанология. 2000. Т.40, № 3. С.456–467.
3. Левченко Д.Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне. М.: Науч. мир, 2005. 240 с.
4. Badulin, S.I. Vershinin, V.V. Levchenko, D.G., Ivonin, D.V., Zatsepina, A.G · Ostrovskii, A.G. · Lobkovsky. L.I. A project of concrete stabilized spar buoy as a coastal environmental observation and maritime safety platform. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy. 7, P. 115–127 (2021).doi.org/10.1007/s40722-021-00190-2

РАЗВИТИЕ В КАЙНОЗОЕ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ КОТЛОВИНЫ НАНСЕНА (СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН)

Шрейдер А. А.¹, Сажнева А. Э.¹, Ключев М. С.¹, Бреховских А. Л.¹

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр-т, 36,
aschr@ocean.ru, alexe@ocean.ru*

CENOZOIC DEVELOPMENT OF THE OCEANIC CRUST IN THE NANSEN BASIN (ARCTIC OCEAN)

A.A. Schreider¹, A. E. Sazhneva¹, M. S. Klyuev¹, A. L. Brekhovskikh¹

*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

В котловине Нансена (Евразийский бассейн, Северный Ледовитый океан) исследованы особенности строения рельефа дна, параметров седиментации и поверхности акустического фундамента. Комплексная геолого-геофизическая интерпретация этих данных сделала возможным количественно оценить параметры кинематического развития котловины в кайнозое.

In the Nansen Basin (Eurasian Basin, Arctic Ocean), the structural features of the bottom topography, sedimentation parameters, and acoustic basement surface were studied. A comprehensive geological and geophysical interpretation of these data made it possible to quantify the parameters of the kinematic development of the basin in the Cenozoic.

Геолого-геофизические исследования дна Евразийского Арктического бассейна проводится мировым научным сообществом уже многие годы в контексте восстановления эволюции Северного ледовитого океана как части мировой хозяйственной системы нашей планеты. В середине прошлого века по инициативе Арктического научного комитета была создана международная цифровая модель рельефа дна Арктического океана (The international bathymetric chart of the Arctic Ocean – IBCAO). Постоянно обновляющаяся современная версия батиметрической карты рельефа дна, воссоздаваемая на основе, главным образом

альтиметрических данных, IBСАО V3.0 обладает разрешением часто лучше, чем 0.5x0.5 км. Накопленный объем батиметрических материалов свидетельствует о том, что рельеф дна Евразийского бассейна, разделенный срединно-океаническим хребтом Гаккеля на две вытянутые глубоководные котловины Амундсена и Нансена, обладает значительным разнообразием. Котловина Нансена примыкает к российской континентальной окраине и для ее морфоструктур характерен большой размах глубин рельефа дна от сотен до тысяч метров.

Комплексное геолого-геофизическое изучение особенностей строения рельефа дна, параметров седиментации и поверхности акустического фундамента в котловине Нансена позволило количественно оценить параметры кинематического развития котловины в кайнозое.

Это позволило впервые систематически исследовать опубликованные сейсмические данные, несущих в пункте сейсмического зондирования сведения одновременно о рельефе дна, мощности осадков и поверхности акустического фундамента вместе с современными сведениями о возрасте океанической коры в котловине Нансена. В результате удалось уточнить параметры кинематики развития котловины в кайнозое. Расчеты показывают, что мощности осадочных пород в пределах коры с возрастом более 35 млн. лет испытывают значительные вариации в пределах от значений в сотни метров до 3-5 километров. Это, несомненно, связано с неоднородностью распределения питающих провинций и скоростями поступления осадочного материала вдоль континентальной окраины Сибири. Намечаются изменения характера заглубления фундамента начиная с возраста около 25 млн. лет назад. При этом поверхность акустического фундамента в целом заглубляется от величин примерно 4 км при возрасте литосферы около 8 млн. лет до значений примерно 7 километров при возрасте более 50 млн. лет. Данный результат подтверждает общую закономерность заглубления поверхности дна и океанической коры во времени, известную в литературе и конкретизирует ее для случая котловины Нансена.

Настоящая работа выполнена в рамках Государственного задания № FMWE – 2021 – 0004.

ПРИМЕНЕНИЕ МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ РАЗЛОМОВ НА ШЕЛЬФЕ ПЕЧЕРСКОГО МОРЯ

Либина Н.В., Ковачев С.А.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, г. Москва, Нахимовский пр-т 36, 8(903)684-30-44
lnatvit@mail.ru*

APPLICATION OF MORPHOMETRIC METHODS FOR THE IDENTIFICATION OF FAULTS ON THE SHELF OF THE PECHERSK SEA

Libina N.V., Kovachev S.A.

*Shirshov Institute of oceanology RAS,
36 Nahimovskyprospect, Moscow, Russia, 117997*

Методы геоморфометрии используемые при различных наземных исследованиях рельефа могут быть применены для выявления линеаментов также и на морском дне. В данной работе показано выделение разломов в Печерском море при помощи двух методов морфометрического анализа.

Geomorphometry methods used in various land-based relief studies can be applied to identify lineaments also on the seabed. This paper shows the identification of faults in the Pechersk Sea using two methods of morphometric analysis.

Сейсмическая опасность северо-восточной части Печорского моря и юго-западной части Карского моря в основном определяется Северо-Уральским линеаментом, который прослеживается от материка к южной оконечности архипелага Новая Земля на шельфе Печорского моря. Линеамент выделен с помощью ряда геологических и геофизических методов, перечисленных в работе [1], но все они являются косвенными. При отсутствии прямых сейсмологических наблюдений с использованием автономных сейсмографов, которые могут выполняться по методике, изложенной, например, в [2], необходимо использовать новые методы, обеспечивающие верификацию пространственного положения и других

параметров основной зоны возможных очагов землетрясений (зона ВОЗ) в исследуемом морском нефтегазовом районе.

В качестве таких методов стоит рассмотреть методы геоморфометрии применимые для морфотектонического анализа [3]. В данной работе представлен один из возможных вариантов выявления линеаментов - выделение килевых форм рельефа в результате расчета профильной кривизны.

Морфометрические методы выделения разломов также, как и дистанционное зондирование при наземных исследованиях основываются на том, что многие крупные линеаменты, как правило, заложены по глубинным разломам той или иной активности. Особенности глубинного строения фундамента проецируются на дневную поверхность через осадочный чехол, контролируя основу формы рельефа.

Для расчета профильной кривизны рельефа дна использовался фрагмент ЦМР дна Баренцева моря [4] дополненный данными ЦМР ИВСаО по Карскому морю.

Выделение килевых форм рельефа дна проводилась после расчета профильной кривизны. На карте кривизны строились только значения отрицательных форм кривизны соответствующие наибольшему прогибу рельефа. Далее по результатам построения проводилось пока ручное выделение возможных разломов. Выделенные линии разломов были нанесены на карту и сопоставлены со схемой разломов по данным [5] (рис. 1).

На рис. 2 показана карта рельефа дна Печерского моря с нанесенными линиями разломов полученных по результатам линеаментного анализа методом выделения килевых форм рельефа и разломы по данным [5]. Все расчеты и построения линий возможных разломов выполнялись при помощи программного комплекса Surfer.

Сопоставление карты разломов выделенных по ЦМР с данными [5] показало хорошую корреляцию в районе сильной изменчивости рельефа дна, в частности у побережья южного острова архипелага Новой земли, в проливе Карские ворота. Соответственно, в районе слабовыраженных изменений рельефа выделено мало разломов, и корреляция с данными [5] практически отсутствует.

Применение геоморфометрических методов для выявления разломов позволяют, используя только данные батиметрии в виде ЦМР, провести предварительное выделение разломов, проявленных в рельефе дна без данных геолого-геофизических исследований района.

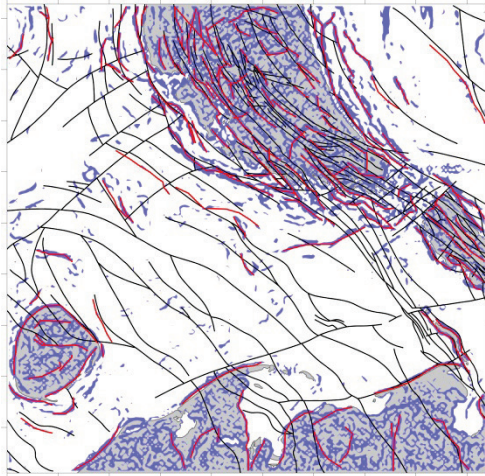


Рис. 1. Карта линеаментов полученная по результатам расчета профильной кривизны рельефа дна

Голубым показаны килевые формы рельефа; красные линии – линеаменты выделенные по килевым формам; черные линии – разломы по данным [5].

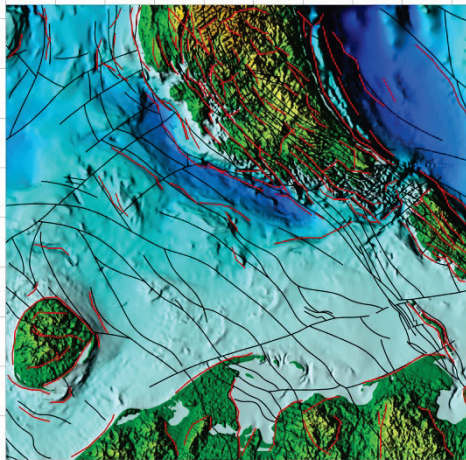


Рис. 2. Карта рельефа дна Печерского моря с выделенными разломами. Красные линии – линеаменты полученные по результатам морфометрического анализа; черные – по данным [5].

Использование морфометрических методов анализа рельефа дна, пока мало используются, в отличие от наземных условий, где они за последние годы нашли широкое применение благодаря развитию цифровых методов обработки данных [6].

В данной работе присутствует ручное выделение разломов на основе интерпретации морфометрических характеристик (килевых форм), это может приводить к пропуску или ошибочному выделению разломов. Методика выделения разломов по данным рельефа дна пока находится в стадии разработки. У нас это был первый опыт, показавший перспективность данного направления и необходимость дальнейших исследований, как в отработке данной методики, так и в использовании других морфометрических методов анализа рельефа.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № FMWE-2021-0005.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грачев А.Ф. (ред.), 2000. Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М.: Изд-во “ПРОБЕЛ”. 2000. 487 с.
2. Казанцев Ю.В., Казанцева Т.Т., Камалетдинов М.А., Ковачев С.А., Первые результаты сеймотектонических исследований на территории Башкортостана // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 344. № 6. С. 801-805.
3. Лопатин Д. В., Ликотов Е. Ю. Структурная и поисковая геоморфология. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2018. – 272 с.
4. Никифоров С.Л., Попов О.Е., Попов В.А., Селезнев И.А. Концепция создания единой базы геоакустических данных морского дна и технологии геоакустического моделирования // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. №6. – С. 25-32.
5. Вискунова К.Г., Зархидзе В.С., Зинченко А.Г. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (новая серия). Лист R-38-40 - о. Колгуев. Объяснительная записка. – СПб.: Изд-во СПб картофабрики ВСЕГЕИ, 2003. 289 с. <https://www.geokniga.org/maps/2230>.
6. И.В. Геоморфометрия сегодня // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2021. – Т. 27. – № 2. – С. 394–448.

ДИНАМИКА $p\text{CO}_2$ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ 2015 – 2021 ГГ.

Орехова Н.А., Медведев Е.В.

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»,

*ул. Капитанская, 2, г. Севастополь, 299011,
+7 8692 54 52 41*

E-mail – Natalia.orekhova@mhi-ras.ru

**PCO₂ DYNAMICS AT THE SURFACE WATERS OF THE BLACK SEA IN
2015 - 2021**

Orekhova N., Medvedev Eu.

*FSBSI FRC Marine Hydrophysical Institute of RAS,
Kapitanskaya str., 2, Sevastopol, 299011*

В работе изучена внутри- и межгодовая динамика $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод северной части Черного моря по данным прямых измерений, полученных в 2015 – 2021 гг. Отмечено снижение $p\text{CO}_2$ от весеннего к осеннему сезону, при этом особенности межгодовой динамики не выявлены.

The work includes the study of intra-and interannual $p\text{CO}_2$ dynamics in the surface waters of the northern part of the Black Sea, obtained by direct measurements in 2015-2021. There was a decrease in $p\text{CO}_2$ from the spring to the autumn, while the features of the interannual dynamics were not revealed.

Непрерывный рост содержания углекислого газа (CO_2) в атмосфере (0,4% в год) привел к негативным последствиям для экосистемы Мирового океана – отмечается нарушение природных химических равновесий, в частности карбонатных, снижение рН, увеличение концентраций растворенного углекислого газа, увеличение скорости продукции и окисления органического вещества, сопровождающиеся снижением концентраций кислорода и появлением зон его дефицита.

Прибрежные экосистемы и внутренние моря являются одними из самых динамичных в биогеохимическом отношении, поскольку на них влияют несколько факторов, включающих высокие показатели первичной продукции, реминерализации и захоронения органического углерода. К таким экосистемам можно отнести Черное море – внутреннее, полузамкнутое, межконтинентальное море.

Целью данной работы является изучение пространственно-временной динамики $p\text{CO}_2$, как одного из ключевых параметров карбонатной системы, в поверхностном слое вод северной части Черного моря по данным прямых измерений.

В работе использованы данные, полученные в ходе выполнения экспедиционных исследований на НИС «Профессор Водяницкий» в северной части Черного моря в 2015–2021 гг. в различные гидрологические сезоны – с апреля по декабрь.

Для прямого определения объёмной концентрации и парциального давления CO_2 использовался инфракрасный анализатор LI-7000.

За период исследований (2015 – 2021 гг.) парциальное давление углекислого газа в поверхностном слое вод изменялось в широких пределах – от 324 до 570 мкاتم. Средняя величина $p\text{CO}_2$ глубоководного района превышала величину шельфового района примерно на 20 мкاتم. Наибольший разброс значений $p\text{CO}_2$ (± 45 мкاتم) был отмечен также в поверхностном слое вод глубоководной части.

Анализ сезонной изменчивости показал снижение $p\text{CO}_2$ от весеннего к осеннему сезону на 30% и 23% для глубоководного и шельфового районов соответственно. Прослеживалась выраженная внутригодовая изменчивость – от апреля к декабрю (рис. 1, а).

Т.к. $p\text{CO}_2$ связано с pH и зависит от температуры, также был рассмотрен сезонный ход pH (рис. 1, б), как одного из биотических факторов, и температуры (рис. 1, в), как одного из абиотических факторов.

Характер зависимостей $p\text{CO}_2$ от pH и температуры отличается (рис. 2). Если в сезонном распределении $p\text{CO}_2$ и pH прослеживается обратная квазилинейная взаимосвязь (рис. 1, а, б), то в распределении температуры эта связь не так очевидна. Это обусловлено, прежде всего, тем, что, с одной стороны, увеличение температуры приводит к снижению растворимости углекислого газа и, как результат, его парциального давления, однако, с другой стороны, увеличение температуры приводит к интенсификации процессов окисления органического вещества и продукции CO_2 , тем самым увеличивая $p\text{CO}_2$, что и наблюдается в летний период (рис. 1, в).

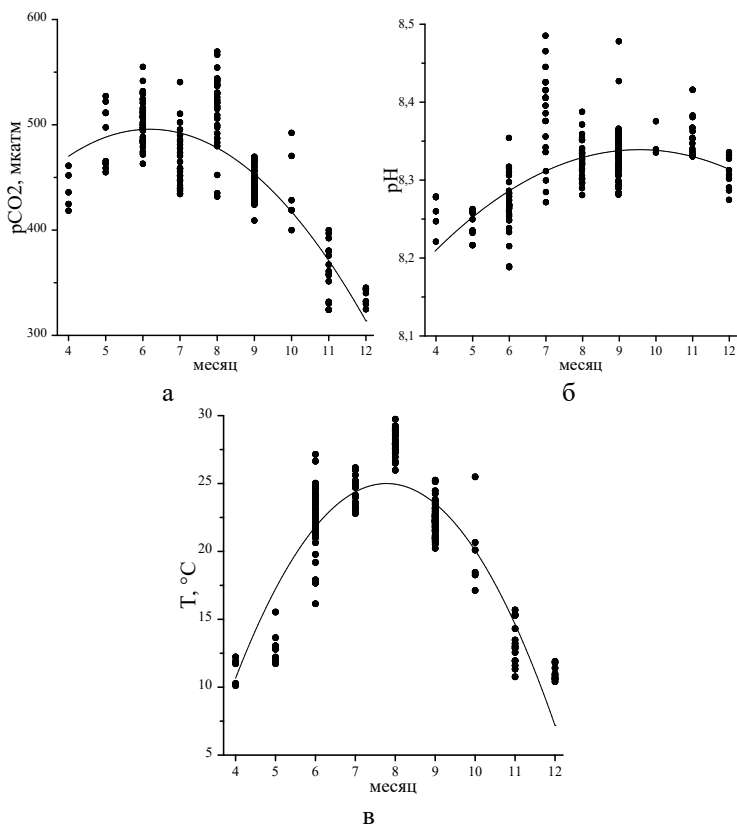


Рис. 1. Внутригодовая динамика pCO_2 (а), pH (б) и температуры (в) поверхностного слоя вод по данным 2015 – 2021 гг.

Данные измерений в январе – марте отсутствуют, однако можно предположить вид кривой в виде синусоиды, и рост pCO_2 в январе – марте. Минимальные значения pCO_2 приходится на ноябрь – декабрь (рис. 1, а).

Выполненный для всех сезонов корреляционный анализ не выявил статистически (на уровне 95% достоверности) значимой связи с первичной продукцией, при этом отмечена средняя корреляции (на уровне 95% достоверности) с температурой (коэффициент корреляции 0,65). С величиной pH статистически значимая средняя корреляция наблюдалась только в июне (коэффициент корреляции $-0,52$) в период максимального цветения кокколитофорид [1, 2].

Особенности межгодовой динамики не выявлены. Максимальные значения $p\text{CO}_2$ отмечены в 2017 г. (вспышка цветения кокколитофорит) и в 2021 г.

Анализ сезонной изменчивости показал снижение величины $p\text{CO}_2$ от весеннего к осеннему сезону. Прослеживалась выраженная внутригодовая динамика – увеличение $p\text{CO}_2$ от апреля к августу, а затем его снижение, с минимумом в декабре.

Можно предположить, что в зимний и ранне-весенний периоды $p\text{CO}_2$ определяется, прежде всего, абиотическим фактором – влиянием температуры и динамики вод, а также в результате роста вклада обмена с атмосферой в результате изменений на поверхности раздела фаз (шероховатость, барбатирование). В летний период – за счет протекания биогеохимических процессов окисления органического вещества и карбоната кальция при развитии кокколитофорид. В осенне-зимний период по мере затухания активности биологических процессов, преобладающими становятся физические процессы переноса CO_2 .

Таким образом, динамика $p\text{CO}_2$ определялась комбинацией биотических и абиотических факторов, при этом вклад каждого фактора изменялся от сезона к сезону.

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФГБУН МГИ FNNN-2022-0002 «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO_2 в морской среде Черного и Азовского морей» (Шифр: «Карбоновый полигон»).

ЛИТЕРАТУРА

2. Vostokov, S.V. Seasonal and long-term variability of coccolithophores in the Black Sea according to remote sensing data and the results of field investigations / S.V. Vostokov; A.S. Vostokova, S.V. Vazyulya / J. Mar. Sci. Eng. – 2022. – 10. – 97. <https://doi.org/10.3390/jmse10010097>
3. Востоков, С.В. Сезонная и многолетняя изменчивость фитопланктона в Чёрном море по данным дистанционного зондирования и контактными измерениями хлорофилла а / С.В. Востоков, Л.И. Лобковский, А.С. Востокова, Д.М. Соловьев // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 485. - №1. - С. 99-103. doi: [10.31857/S0869-5652485199-103](https://doi.org/10.31857/S0869-5652485199-103)

**АНАЛИЗ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ СОДЕРЖАНИЯ
НЕФТЕУГЛЕВОДОРОДОВ В ЗАЛИВЕ ГРЕН-ФЬОРД (ЗАПАДНЫЙ
ШПИЦБЕРГЕН)**

**Александрова А.Г.¹, Демешкин А.С.²,
Александрова Н.В.³**

- ¹ Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Российская Федерация, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01, osh.morgeo@mail.ru,
² Северо-Западный филиал ФГБУ «НПО «Тайфун», г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербург, улица Беринга, 38Г, 8 (812) 352-36-24, Российская Федерация, typhoon.ecol@mail.ru
³ МГИМО МИД России, г. Москва, 119454, Москва, проспект Вернадского, 76, Российская Федерация, alexandrova.n.v@my.mgimo.ru.

**ANALYSIS OF THE LONG-TERM DYNAMICS OF THE
CONTENT OF OIL HYDROCARBONS,
THE GREN FJORD BAY (WESTERN SPITSBERGEN)
Aleksandrova A.G.¹, Demeshkin A.S.², Alexandrova N.V.³**

- ¹ *Shirshov Institute of Oceanology. Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117996,
8(499)124-13-01, osh.morgeo@mail.ru,*
² *North-Western branch of the FSBI “NPO Typhoon”,
St. Petersburg, St. Petersburg, Bering street, 38G, 8 (812) 352-36-
24, typhoon.ecol@mail.ru*
³ *MGIMO University, Moscow, 119454, Moscow, Vernadsky
Avenue, 76, aleksandrova.n.v@my.mgimo.ru.*

Цель данной работы в том, чтобы на основе имеющихся данных исследовать пространственно-временную изменчивость концентраций нефтяных углеводородов в районах активной хозяйственной деятельности, а в частности водах Гренландского моря, выявить особенности в распределении, что может в дальнейшем послужить для выполнения комплексной оценки влияния антропогенного воздействия (нефтяного загрязнения) и

выявить причинно-следственные связи между происходящими изменениями и влияющими факторами.

The purpose of this work is to investigate the spatial and temporal variability of petroleum hydrocarbon concentrations in areas of active economic activity, and in particular, the waters of the Greenland Sea, on the basis of the available data, to identify features in the distribution, which can further serve to a comprehensive assessment of anthropogenic impact (oil pollution) and identify ongoing changes and influencing factors.

В настоящее время имеются достаточно полные многолетние ряды достоверных наблюдений за физическими характеристиками морских вод и лишь отрывочные данные по гидрохимическим параметрам водной среды (в том числе по содержанию углеводородов нефти в морской воде и донных осадках). Очевидно, что создание специализированных банков данных гидрохимических наблюдений на сегодня является важнейшей задачей в целях экологического мониторинга и оценки загрязнения компонентов природной среды.

Район исследования охватывает бассейн залива Грэн-фьорд, расположенный на о. Западный Шпицберген в пределах земли Норденшельда и являющийся юго-западным рукавом фьорда Ист-фьорд. Грен-фьорд (архипелаг Шпицберген, Гренландское море).

Залив простирается в южном направлении на 17 км, максимальная глубина составляет 155 м, расположен в западной части архипелага, между параллелями 77°07' и 77°58' с.ш. и меридианами 13°56' и 14°20' в.д., простирается меридионально на юг–юго–восток и собственно является юго-западным рукавом Ист-фьорда, далеко вдаётся в сушу, его южное побережье окаймляют относительно крупные ледники, при этом акватория залива свободно сообщается с арктическим бассейном. Необходимо отметить, что Северо-Европейский бассейн (СЕБ), к которому относятся Норвежское и Гренландское моря, играет ключевую роль в обмене между Арктическим Бассейном (АБ) и Северной Атлантикой. Общая площадь водосбора составляет более 193 км², из которых 60 км² подвержены оледенению [1].

В основу исследования положены материалы полевых работ, выполненных в 2012–2021 гг. – данные, полученные в рамках экспедиционных работ Северо-Западного филиала НПО «Тайфун» (г. Санкт-Петербург) на НИС «Баренцбург» в районе архипелага Шпицберген за период 2012–2021 гг. по осуществлению локального мониторинга загрязнения окружающей среды, включающий

инструментальные наблюдения, а также химико-аналитические работы и исследования. Экспедиционные исследования носили комплексный характер, включая одновременные измерения гидрологических и гидрохимических характеристик водной толщи.

Суммарное содержание нефтяных углеводородов (НУ) в 2012 г. в водах акватории залива Гренфьорд находилось в пределах 9,58 (на станции 11) до 39 мкг/дм³ (на станции 14), при среднем значении 19,66 мкг/дм³ (табл.1). В 2013 г. в водах акватории восточной части акватории залива Гренфьорд содержание НУ составляло в пределах 2 (станция 26) – 86 (станция 14) мкг/дм³, при среднем значении 10,48 мкг/дм³.

В 2014г. суммарное содержание нефтяных углеводородов (НУ) в водах акватории – изменялось в пределах 2,61 (станция 11) – 70 (станция 26) мкг/дм³, при среднем значении 26,21 мкг/дм³. В 2015 содержание НУ в водах акватории изменялось в пределах 5,67 (станция 101) – 70 (ст. 12) мкг/дм³, при среднем значении 25,71 мкг/дм³. В 2016 концентрации НУ составили диапазон от 5,67 (станция 101) – 42,1 (станция 12) мкг/дм³, при среднем значении 25,71 мкг/дм³.

В 2017г. диапазон концентраций НУ – от 0,6 (станция 33) до 5,2 (станция 26) мкг/дм³ при среднем значении 2,8 мкг/дм³.

Табл. 1. Средние и максимальные значения суммарного содержания нефтяных углеводородов (НУ), (мкг/дм³) в поверхностных водах за период с 2012 по 2021 гг.в различных районах моря.

Станции/содержание НУ(мг/дм ³)	10	11	12	13	28	29	30	31	32	33
Средняя конц.	7,4	7,1	7,1	10,6	10,4	13,7	7,1	11,6	9,3	5,3
Макс. конц.	24,0	27,0	42,1	36,0	33,6	28,6	19,0	36,0	37,6	19,5

Станции/содержание НУ(мг/дм ³)	34	14	15	26	27
Средняя конц.	9,0	22,8	18,2	17,1	9,7
Макс. конц.	23,7	86,0	57,0	70,0	26,0

В 2018г. суммарное содержание нефтяных углеводородов (НУ) в водах акватории изменялось в пределах от 7,1 (станция 89) – 23,7 (станция 27) мкг/дм³, при среднем значении 12,20 мкг/дм³. В 2019 НУ в водах акватории изменялось от 1,00 (станция 89) – 32 (станция 15) мкг/дм³, при среднем значении 15,18 мкг/дм³. В 2021г. концентрации НУ составили диапазон от 5,67 (станция 101) – 3,83 (станция 27) мкг/дм³ при среднем значении 4,07 мкг/дм³.

Для различных районов моря средние концентрации (НУ) в изучаемом районе арх. Шпицберген уменьшались в последовательности: от акватории залива Грен-Фьорд в районе впадения ручья, протекающего через п. Баренцбург, станция 14 (22,82) – к акватории залива севернее п. Баренцбург – станция 27 (9,78) и станция 33 (5,39) (Западная часть < Центральная часть).

Максимальные значения содержания нефтяных углеводородов (НУ), (мкг/дм³) в поверхностных водах за период с 2012 по 2021 г. в различных районах моря изменялись от 19 (станция 30) до 86 мкг/дм³ в районе впадения ручья, протекающего через поселок Баренцбург (станция 14).

Отдельные максимумы концентраций по нефтяным углеводородам в поверхностном горизонте, могут быть подтверждением того, что хозяйственная деятельность приводит к интенсивному антропогенному воздействию на акваторию залива вдоль береговой полосы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьянова И.Ю., Третьяков М.В. Наблюдения за стоком взвешенных наносов рек бассейна залива Грэнфьорд // Комплексные исследования природы Шпицбергена. 2004. Вып. 4. С. 230–236.

О ДИНАМИКЕ ПОДЪЕМА ПУЗЫРЬКОВ МЕТАНА ИЗ МОРСКИХ НЕДР

Амбросимов А.К.

Институт океанологии им П.П. Шишова РАН, ambrosimov@ocean.ru

ABOUT THE DYNAMICS OF THE RISE OF METHANE BUBBLES FROM SEA BODIES

Ambrosimov A.K.

Shirshov Institute of Oceanology RAS

В работе представлены оценки скорости подъема метановых пузырьков и воды, вовлеченной в струю сипа. Показано, что в период выхолаживания поверхности моря в Арктике возникают гравитационные потоки вглубь моря, которые препятствуют выходу метана в атмосферу из-за увеличения траектории подъема и увеличивается время диффузии и растворение метана.

The paper presents estimates of the rate of rise of methane bubbles and water involved in the seep jet. It is shown that during the period of cooling of the sea surface in the Arctic, gravitational flows occur deep into the sea, which prevent the release of methane into the atmosphere due to an increase in the ascent trajectory and increase the time of diffusion and dissolution of methane.

Потепление климата сдвинуло зону ледового покрытия арктических морей далеко на север, в результате чего открылись обширные неизученные пространства шельфовой зоны России, о которых, практически, отсутствует океанологическая информация. На этих пространствах в последние годы зарегистрированы обширные провинции выходов метана из морских недр, что усугубляет процесс климатических изменений, поскольку удельный потенциал глобального потепления из-за воздействия метана в 21-25 раз превышает воздействие такой же массы двуокиси углерода [1]. За последние 150 лет в атмосфере произошло удвоение концентрации метана с 850 ppb до 1750 ppb [2-3]. Поэтому целью

данной работы является оценка динамики переноса метана в натуральных условиях водной среды арктических морей.

Физико-химический процесс растворения и подъема пузырька метана имеет сложный путь. Не весь газ из сипов достигает атмосферы, факелы сипов в водной среде имеют ограниченную высоту подъема из-за растворения метана в морской среде. Количество газа, попадающего в окружающую морскую среду, зависит от многих факторов, главным из которых является диффузия метана. Диффузия через поверхность пузырька в водную среду зависит от многих факторов, наиболее важными из которых являются парциальное давление, размер пузырька, время контакта пузырька с водой, скорость подъема, наличие поверхностно-активных веществ в водной среде и др.[2,4].

По данным исследований [3] в глубоководном море доминирует вынос метана в атмосферу через турбулентный перенос. В мелководном море, происходит прямой выброс метана в атмосферу и где наибольшее значение, имеют время подъема пузырьков к поверхности моря и течения.

Модельные эксперименты по оценке динамики изменения объемов и газового состава в пузырьках, а также скоростей подъема на разных глубинах воды показали [4], что при подъеме метан растворяется в водной среде и размеры пузырьков при подъеме уменьшаются

Приборы и методы наблюдений

В экспериментах по определению скорости подъема пузырьков газа и вовлеченной воды в центр сипа диаметром около 6-8 м на глубину 1-2 м опускались измерители течений ADCP и вертушечного типа «Вектор-2» и проводили измерения от центра сипа к его периферии. Результаты наблюдений в течение ~90 сек в одном из таких сипов представлены на рис. 1а.

Исходные данные.

Выходы сипов на поверхность моря, как правило, наблюдались на глубинах 20-30 м и не превышали 4-8 м в диаметре. Акустические наблюдения с борта судна показали, что часть сипов не достигает поверхности, поскольку весь газ при подъеме растворяется.

Было обнаружено, что при движении струи газа к поверхности пузырьки вовлекают в движение окружающую воду, которая поднимаясь к поверхности моря нарушает вертикальную структуру термоклина. Данные показали, что скорость подъема воды в сипе варьирует в пределах 25-30 см/с (рис.2б,в). По данным наблюдений большинство выходов сипов на дне Восточно-Сибирского моря сосредоточено в глубоких экзарационных бороздах.

Обсуждение результатов наблюдений

Примером воздействия течения на сип являются наблюдения, выполненные на станции «Суперсип» в море Лаптевых, где ранее над континентальным склоном неоднократно на поверхности моря регистрировался факел сипа гигантских размеров. В экспедиции на НИС «Академик Мстислав Келдыш» октябре 2021 г. сип не обнаруживался на поверхности моря, хотя его присутствие в приводном слое атмосферы регистрировалось аналитическими приборами, а у дна акустическими.

Ситуация объяснялась следующим образом, был октябрь и происходило осеннее выхолаживание поверхности моря при штормовом ветре. В толще моря образовались два пикноклина – один классический сверху под поверхностью на глубине 5-10 м, а второй в глубине над более теплыми водами с высокой соленостью и высокой плотностью (рис.3а). Второй пикноклин возник в результате резкого осеннего охлаждения поверхностных вод и их гравитационного опускания вниз. Нижний пикноклин постепенно опускается вниз, по мере его перемешивания с опускающимися водами.

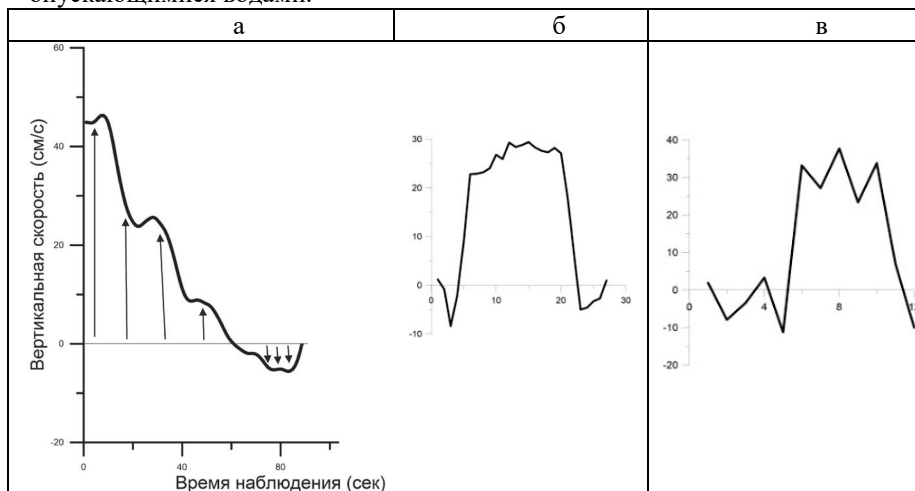


Рис. 2. Профиль вертикальной скорости движения пузырьков метана от центра к краю сипа и вертикальные распределения скорости воды в сипах, вовлеченной пузырьками газа.

Увеличение температуры от верхнего к нижнему пикноклину по данным наблюдений составило 1.1°C (рис.3а), при одновременном увеличении солености на 2.2 ‰. Произошла инверсия температуры в слое толщиной около 125 м при глубине моря 375 м. Под верхним термоклином температура составила -1.12°C , а под придонным -0.1°C . При накоплении

над придонным пикноклином достаточной массы холодной воды и ослаблении градиента плотности в самом пикноклине, происходит его прорыв и тяжелая вода каскадингом срывается вниз по склону. При выхолаживании и опускании поверхностных вод вниз, в нижних слоях моря возникает вертикальная циркуляция вод – отток вод и усиление горизонтальных течений в толще, а в поверхностных водах приток и замещение. Гравитационный конвективный поток сверху вниз создает мощное давление на нижележащие слои воды, вызывая интенсивное горизонтальное течение со скоростями до 1.3 м/с. Это течение сносит и рассеивает вертикальные струи сипов, препятствуя концентрированному выходу газа на поверхность. На рис.3б. представлен вертикальный профиль горизонтального течения по данным измерений судового ADCP.

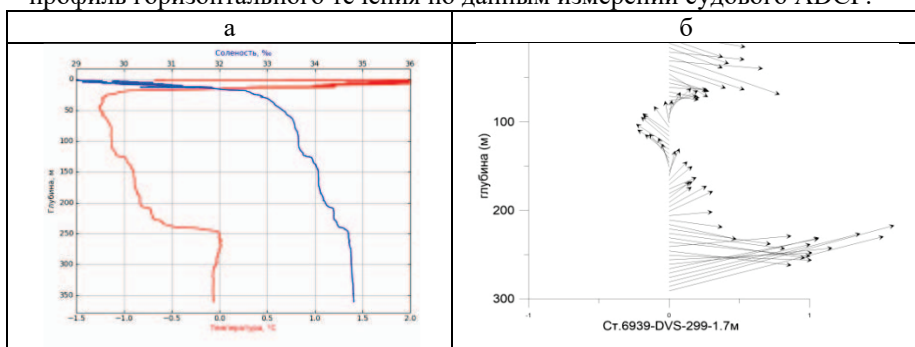


Рис.3. а) Вертикальный профиль температуры и солёности при конвективном охлаждении толщи моря Лаптевых над континентальным склоном в октябре 2020 г. (красная кривая – температура, синяя – солёность); б) Вертикальные профили скорости течения над континентальным склоном моря Лаптевых в районе станции «Суперсип».

STD-профили температуры и солёности, полученные на полигоне «Суперсип» в море Лаптевых в 82-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»), отражают картину гравитационного переноса вод от поверхности до дна моря Лаптевых в осенний период [3]. При остывании и погружении холодных поверхностных вод вглубь моря, придонный пикноклин также опускается вниз. По мере охлаждения, пикноклин опускается до дна и переходит на континентальный склон. При превышении плотностного градиента между опускающимися водами и пикноклином происходит прорыв этой границы, и холодные воды устремляются вниз, образуя каскадинг.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (1996), *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, 572 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
2. Epstein, P. S., and M. S. Plesset (1950), On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions, *J. Chem. Phys.*, 18, 1505 – 1509.
3. Амбросимов А.К., Ковалев Г.А. Гидрология и течения Карского моря в весенне-летний период 2019 г. (43-й рейс НИС «Академик Николай Страхов») // *М. Экологические системы и приборы*. 2020. №1. С. 49-54.
4. Egorov V.N., Polikarpov G.G., Gulin S.B., Artemov Y.G., Stokozov N.A., and Kostova S.K. (2003). Present-day views on the environment-forming and ecological role of the Black Sea methane gas seeps (in Russian). *Mar. Ecol. J.* 5. 5 – 26.

УДК 551.435.52:528.854

ИЗУЧЕНИЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНОГО ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ В ПРИБРЕЖНО-МОРСКИХ УСЛОВИЯХ КАРСКОГО ШЕЛЬФА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел.: (495) 939-29-70,
факс: (495) 932-88-89. E-mail - gavrilov37@bk.ru

**STUDY OF ICE WEDGES FORMATION IN THE COASTAL
CONDITIONS OF THE KARA SHELF USING SPACE DATA**

Gavrilov A.V., Pizhankova E.I.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Russia,
Moscow, GSP-1, 1 Leninskiye Gory, 119991

На примере Карского шельфа рассматриваются методы использования космических данных для изучения закономерностей формирования и картирования повторно-жильных льдов в засоленных прибрежно-морских отложениях арктических морей.

On the example of the Kara Shelf, methods of using space data to study the patterns of formation and mapping of ice wedges in saline coastal-marine deposits of the Arctic seas are considered.

Криогенное (морозобойное) растрескивание горных пород и образование в них повторно-жильных льдов (ПЖЛ) является одним из самых распространенных криогенных процессов, позволяющее фиксировать распространение мерзлоты. О развитии ПЖЛ в голоцене в прибрежно-морских обстановках, где криогенное растрескивание осуществлялось в засоленных прибрежно-морских отложениях практически ничего не известно. Обнаружение, изучение закономерностей распространения и картирование ПЖЛ и других проявлений криогенного растрескивания стало возможным благодаря появлению в открытом доступе глобального покрытия World Imagery [1]. Оно создано по космическим снимкам (КС) с высоким пространственным разрешением (0,3-1,7м), полученным со спутников GeoEye, WorldView-2,4 за последние годы (2010–2020).

Развитию повторно-жильного льдообразования способствуют низкие температуры пород, большие значения амплитуд их колебаний на поверхности пород, высокие дисперсность и влажность отложений. Чем ниже температура, выше ее годовая амплитуда, дисперснее состав и выше влажность отложений, тем интенсивнее проявляется криогенное растрескивание, т.е. его повторяемость, глубина проникновения трещин и частота трещинообразования, реализуемая в размере полигональной решетки. В пылеватых суглинках и супесях формирование ПЖЛ или грунтово-ледяных жил становится возможным при среднемноголетних температурах, составляющих $-2...-4^{\circ}\text{C}$. В пресных песках подобная возможность реализуется при температурах -5 . Засоление прибрежно-морских осадков существенно затрудняет их морозобойное растрескивание. Так, в оторфованных сильновлажных отложениях морской террасы низовой Колымы ПЖЛ начинают формироваться при среднемноголетней температуре пород -11°C , тогда как при отсутствии засоления – при $-2...-3^{\circ}\text{C}$ [2].

Вынесение суждения о фациальных условиях седиментации и, соответственно, о составе и влажности отложений, а также об условиях снегонакопления, влияющих на амплитуды температур на поверхности пород, осуществляется в результате анализа целого ряда источников. Это содержание карт литологии морского дна [3, 4], литературные данные [5, 6], космическая информация о местоположении конкретного аккумулятивного образования и наличие/отсутствие в его пределах полигонального микрорельефа.

Основные дешифровочные признаки формирующихся ПЖЛ – это приуроченность полигонального микрорельефа к современным береговым аккумулятивным формам, преимущественно прямоугольная форма полигонов, четко очерченные линии межполигональных понижений, свидетельствующие о современном развитии процесса. Полигональная решетка в голоценовых отложениях (от 40-50 до 100 м) существенно крупнее полигональной сети, сформированной в морскую изотопную стадию (МИС) -2, имеющей размеры 10-25 м.

Современный полигональный микрорельеф дешифрируется в основном только в пределах северо-восточной части Карского шельфа, прилегающей к Таймыру. Это внутренние части лагун островов Тройной и Пологий-Сергеева (о-ва Известий ЦИК), Русский (архипелаг Норденшельда), Расторгуева (о-ва Каменные), а также лагуны у южного берега п-вов Минина, Михайлова (Таймыр, южная оконечность берега Харитона Лаптева). Это наиболее холодная и континентальная часть шельфа. Значения температур воздуха (T_B) составляют от -12 до -14°C [7] и соответствуют таковым близ устья Колымы ($-12,7^\circ\text{C}$, ГМС Амбарчик¹). Но величина амплитуд температур воздуха (A_B) = $30-32^\circ\text{C}$ существенно меньше, чем в низовьях Колымы ($37,2-38^\circ\text{C}$) (по данным ГМС Амбарчик и [7]). Пониженная континентальность в сравнении с побережьем близ устья Колымы, является одной из причин отсутствия ПЖЛ на значительной части островов.

На северо-западе Карского шельфа в условиях еще более сниженной континентальности климата (о. Визе, $A_B=26,5^\circ\text{C}$; м. Желания на Новой Земле, $A_B=23,7^\circ\text{C}$) и более низких значений T_B ($-10,5^\circ\text{C}$ о. Визе и $-9,7^\circ\text{C}$ м. Желания) образуются только трещины, по нормали секущие систему кос и заболоченных понижений в отгороженной от моря лагуне. Снижению континентальности отвечает увеличенное отстояние трещин друг от друга (до 150-170 м), в то время как в низовьях Колымы (ключевом участке для настоящих исследований) размер полигональной решетки составляет 70-100 м [2]. На пересыпях островов Известий ЦИК, отшнуровавших лагуну от моря, он варьирует от 40 до 75 м. Остров Тройной - единственное место на арктическом шельфе, где полигоны фиксируются под водой.

Другой причиной слабого проявления криогенного растрескивания в регионе является устойчивость к выветриванию и размыву осадочно-метаморфических и магматических пород островной суши, прилегающей к Таймыру. Пляжи и косы островов сложены галечником, гравийником или песками, криогенное растрескивание в которых при их засолении требует

¹ В сообщении используются данные о температуре воздуха 1960-70 гг.

наличия температур, сопоставимых с таковыми в МИС-2. Поэтому внешние (морские) берега пересыпей и кос, ограничивающих лагуны, на всех островах Карского моря лишены проявлений криогенного растрескивания. Растрескиванию и образованию повторно-жильных льдов подвергаются исключительно внутренние части лагун, где создаются условия для накопления тонкого илистого материала.

Выводы

1. Наличие в свободном доступе глобального покрытия World Imagery, созданного по космическим снимкам с пространственным разрешением менее 1 м, позволяет обнаруживать, изучать закономерности и картировать повторно-жильное льдообразование на формах современной и голоценовой аккумуляции на шельфе арктических морей.

2. Карский шельф характеризуется развитием повторно-жильного льдообразования в приконтинентальной северо-восточной части. Ей свойственны наиболее низкие температуры воздуха и наибольшие значения их амплитуд.

3. Криогенное растрескивание и образование повторно-жильных льдов на Карском шельфе в основном приурочено к внутренним частям лагун, где создаются условия для накопления тонкого илистого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>
2. **Зайцев В.Н.** Закономерности формирования мерзлотно-геологических условий и особенности современного повторно-жильного льдообразования на территории приморских низменностей Якутии. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Изд. МГУ, 1976, 25 с.
3. **Государственная геологическая карта** Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист Т-45-48 – м. Челюскин. Объяснительная записка. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2013, 568 с.
4. **Государственная геологическая карта** Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист S-44 Диксон, S-45 Усть-Тарей. Объяснительная записка. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2020, 450 с.
5. **Романенко Ф.А., Михалев Д.В., Николаев В.И.** Подземные льды на островах у берегов Таймыра // Материалы гляциологических исследований. № 91. 2001. С. 129-137.
6. **Романенко Ф.А.** Строение и динамика рельефа островов Карского моря // Динамика Арктических побережий России. М.: Географический ф-т МГУ, 1998. С. 131-153.
7. **Атлас океанов.** Северный ледовитый океан. Главное управление навигации и океанографии Министерства обороны СССР. 1980.

РОЛЬ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ИЗУЧЕНИИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ИСТОРИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

Гаврилов А.В.¹, Малахова В.В.², Пижанкова Е.И.¹, Попова А.А.³

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, тел.: (495) 939-29-70, факс: (495) 932-88-89, e-mail: gavrilov37@bk.ru;

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6, тел.: (383) 330-83-53, факс: (383) 330-87-83, e-mail: malaxv@list.ru;

³ООО «Северные изыскания», 108811, г. Москва, Киевское шоссе 22-й км. (п. Московский), домовл. 4, строение 2, Блок Г, офис 401Г, тел.: (499) 455-54-42, e-mail: PopovaAA@sev-iz.ru

THE ROLE OF MATHEMATICAL MODELING IN THE STUDY OF PERMAFROST AND THE HISTORY OF GEOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE ARCTIC SHELF

Gavrilov A.V.¹, Malakhova V.V.², Pizhankova E.I.¹, Popova A.A.³

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Russia, Moscow, GSP-1, 1 Leninskiye Gory, 119991

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the RAS. 6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, Russia, 630090

³LLC “Northern Survey”, Moscow, Kiev highway 22 km. (v. Moskovsky), home 4, building 2, block G, office 401G, 108811

Существование оледенения в среднем неоплейстоцене и стратиграфия конца кайнозоя для шельфа в районе восточной части островов Анжу (Новосибирские острова) дискутируются. Результаты численного моделирования позволили сравнить три сценария геологического развития этого региона: ледниковый и два неледниковых (при разных стратиграфических схемах).

The existence of glaciation in the Middle Pleistocene and the stratigraphy of the end of the Cenozoic for the shelf in the area of the eastern part of

the Anzhu Islands (New Siberian Islands) are discussed. The results of numerical modeling made it possible to compare three scenarios of the geological development of this region: glacial and two non-glacial (with different stratigraphic schemes).

Метод математического моделирования в региональной геокриологии, теоретический в своей основе, можно назвать еще и экспериментальным, если расчеты для поиска оптимального решения исследовательской задачи осуществляются по ряду сценариев геологического развития территории. Такая задача поставлена в связи с дискуссией вокруг существования оледенения на севере Восточно-Сибирского шельфа в среднем неоплейстоцене и стратиграфии конца кайнозоя островов Новая Сибирь и Фаддеевский. Для о. Новая Сибирь проведено численное моделирование мощности многолетнемерзлых пород (ММП) по трем сценариям. Первый сценарий («А») – ледниковый с данными по стратиграфии [1, 2, 3]. Второй («Б») – неледниковый с такой же стратиграфией, третий («В») – тоже неледниковый, но со стратиграфической схемой [4, 5].

В геолого-структурном отношении о. Новая Сибирь относится к эпипозднекиммерийской платформе. Ее чехол представлен апт-голоценовыми образованиями. Снизу вверх это отложения бунгинской и деревянногорской свит верхнего мела, анжуйской свиты эоцена, нерпичинской и канарчакской свит неоплейстоцена. Сценарии построены в соответствии с геологическим развитием региона за последние 200 тыс. лет.

В сценарии «А» выделяются четыре этапа: доледниковый (200-190 т.л.н.), ледниковый (190-130 т.л.н.), этап дегляциации (от 130 до 70-55 т.л.н.) и этап континентального развития и многолетнего промерзания пород (от 70-55 т.л.н. до современности). В сценарии «Б» большую часть расчетного времени от 200 до 70 тыс.л.н. прибрежно-морские условия практически исключали промерзание пород. В этом случае период многолетнего промерзания в субэаральных условиях насчитывает 70 тыс. лет. В соответствии со сценарием «В» период промерзания острова Новая Сибирь, находившегося в континентальных условиях, составляет не менее 200 тыс. лет. (в соответствии со стратиграфической схемой [4, 5]).

Для верификации результатов моделирования использовались геотермические данные, полученные для урочища Деревянные горы на о. Новая Сибирь [6, 7].

По результатам моделирования в варианте «А», проведенного в соответствии с водно-физическими и теплофизическими свойствами пород, слагающих поднятие Деревянных гор, рассчитанное значение мощности

мерзлых пород - 278 м (рис. 1) показывает хорошее соответствие значению мощности ММП (240 м), полученному при экстраполяции фактических термометрических данных по скважине.

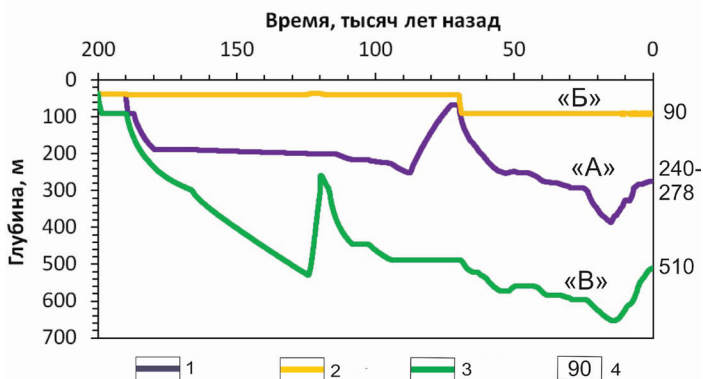


Рис. 1. 1-3 – эволюция мощности мерзлых пород в течение последних 200 тыс. лет в соответствии со сценариями «А» (1); «Б» (2); «В» (3). 4 - значения мощности ММП, м.

Результаты расчета по сценарию «Б» дают мощность ММП, равную 90 м, по сценарию «В» - 510 м. И то и другое не соответствуют геотермическим данным по скважине.

Полученные данные предварительные, но хорошо поддерживаются историей развития криосферы региона в среднем неоплейстоцене-голоцене. На Новосибирских островах описан комплекс разновозрастных толщ ледовых комплексов от морской изотопной стадии (МИС)-2 до МИС-7, исключая МИС-6 [3]. Вместо ледового комплекса в МИС-6 формировался осадочный комплекс, включающий ледниковые и флювиогляциальные отложения.

Проведенные исследования показали, что метод численного теплового моделирования дает возможность не только изучать распространение и мощность ММП, но и предоставлять информацию, которая может использоваться при реконструкции истории геологического развития изучаемых регионов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басилян А.Э., Никольский П.А. Опорный разрез четвертичных отложений мыса Каменный (Новая Сибирь)//Бюл. Комис. по изучению четвертичного периода, 2007, № 67, с. 76-84.

2. Басилян А.Э., Никольский П.А., Максимов Ф.Е., Кузнецов В.Ю. Возраст следов покровного оледенения Новосибирских островов по данным $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - датирования раковин моллюсков. Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen, 2010. С. 506-514.
3. Тумской В.Е. Криостратиграфия и история геологического развития четвертичных отложений Арктической Якутии. Автореф. дисс. докт. геол.-мин. наук, Якутск, 2022, 46 с.
4. Труфанов Г.В. Верхнекайнозойские отложения Новосибирских островов//Стратиграфия и палеогеография позднего кайнозоя Арктики. Л., НПО «Севморгеология», 1982, с. 81-89.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (новая серия). Лист S-53-55 - Новосибирские острова. Объяснительная записка. СПб. Изд-во ВСЕГЕИ, 1999, 208 с.
6. Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей)//Криолитозона арктического шельфа. Якутск, изд. ИМ СО АН СССР, 1981, с. 28-38.
7. Зайцев В.Н. Закономерности формирования мерзлотно-геологических условий и особенности современного повторно-жильного льдообразования на территории приморских низменностей Якутии. Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М., Изд-во МГУ, 1976, 25 с.

УДК 550.83

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ГАЗОВОЙ ЭМИССИИ В МОРЯХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

**Ананьев Р.А.¹, Дмитревский Н.Н.¹, Росляков А.Г.¹,
Черных Д.В.², Мороз Е.А.³**

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-85-47,
corer@mail.ru*

² *Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН, ул. Балтийская, 43, 690041,
г. Владивосток, 8(423)231-14-00, pacific@poi.dvo.ru*

³ *Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, 119017, г.
Москва, 8(495)953-18-19, gin@ginras.ru*

ACOUSTIC MONITORING OF GAS EMISSION PROCESSES IN THE ARCTIC SHELF SEAS

Ananiev R.A.¹, Dmitrevsky N.N.¹, Roslyakov A.G.¹,
Chernykh D.V.², Moroz E.A.³

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

²*Pacific Oceanological Institute of Russian Academy of Sciences,
43, Baltiyskaya Str, Vladivostok, 690041*

³*Geological Institute of Russian Academy of Sciences,
7, Pyzhevskiy Per., Moscow, 119017*

В работе рассматриваются различные аспекты комплексного использования гидро- и сейсмоакустической аппаратуры с целью выявления и мониторинга выходов природного газа со дна моря, а также картирования областей повышенной газонасыщенности в осадках на примере шельфовой зоны морей Северного Ледовитого океана.

The paper considers various aspects of the integrated use of hydro- and seismo- acoustic equipment in order to detect and monitor natural gas seeps from the seabed, as well as mapping areas of increased gas saturation in sediments on the example of the Arctic shelf seas.

Эмиссия природного газа со дна моря к поверхности в шельфовых областях арктических морей вызывает все больший интерес у исследователей в последнее время. Принимая во внимание значительно более высокую удельную производительность дистанционных геофизических исследований по сравнению с любыми контактными методами, акустика является одним из основных инструментов изучения процессов подводной дегазации в океане. Гидро- и сейсмоакустическое оборудование в различных комбинациях было установлено в виде акустического комплекса [1] и успешно использовалось в научных рейсах судов РАН в 2011 - 2022 годах в морях арктического шельфа России [2-4].

В зависимости от поставленных задач в различных комбинациях нами использовались: однолучевые эхолоты Simrad EK 15 и Kongsberg EA 600, многолучевые эхолоты Reson SeaBat 811, Teledyne SeaBat T-50 и

WASSP WMB-3250, сейсмопрофилографы SES-2000, Atlas Parasound P70 и Edgetech 3300, а также комплекс для работ методом непрерывного сейсмоакустического профилирования «Геонт-Шельф» с излучателем типа спаркер.

Наши исследования подтвердили, что наиболее информативным с точки зрения прямой регистрации выходящих в воду газовых потоков является высокочастотное эхолотирование, позволяющее идентифицировать практически все формы газовыделения - от одиночных мелких источников до сплошных газовых «факелов», протяженностью в сотни метров и более. Газовые выходы хорошо регистрируются визуально на экранах таких приборов благодаря существенной разнице в акустическом импедансе между газонаполненным пузырьком и водой (рис. 1).

Одной из задач исследований являлось одновременное использование различных акустических методов, позволяющее сразу изучать как водную, так и осадочную толщу, что повышало достоверность определения местоположения мест подводной дегазации. Кроме того, целью такого комплексирования было определение «корней» газовых сипов, нередко участки подводной дегазации были приурочены к областям повышенной газонасыщенности в осадках, выделяемым по сейсмоакустическим данным [5].

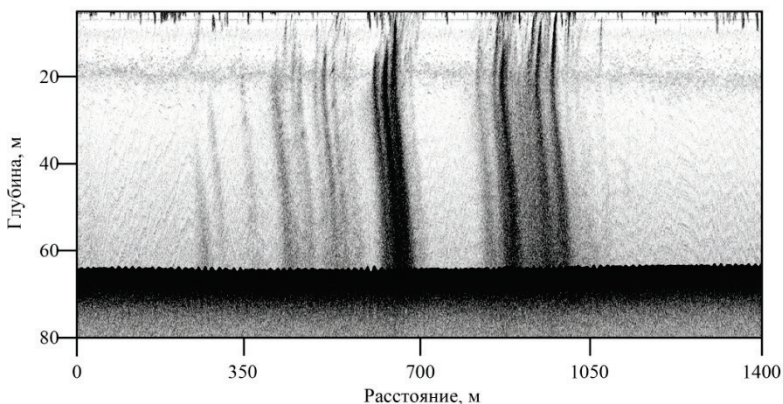


Рис. 1. Газовые выходы в море Лаптевых по данным высокочастотного эхолотирования.

Описанный комплекс акустического оборудования позволил решать большинство задач, связанных с обнаружением, картированием и мониторингом процессов подводной разгрузки газов со дна шельфовой зоны морей Северного Ледовитого океана. Высокое разрешение

использовавшейся аппаратуры, а также удачная схема ее совместного расположения и использования позволили успешно определять местоположение газовых выходов в водную толщу, а также выделять аномалии в осадках, связанные с их повышенной газонасыщенностью.

Картирование проявлений дегазации на шельфе Баренцева и Карского морей производилось за счет проекта РНФ № 22-77-10091.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Росляков А.Г. Использование сейсмоакустического комплекса для исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в восточной Арктике // Океанология. 2013. Т. 53. № 3. С. 412-417. <https://doi.org/10.7868/S0030157413020019>
2. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Мутовкин А.Д., Росляков А.Г. Геолого-акустические исследования в море Лаптевых в рейсе судна «Владимир Буйницкий» // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. С. 128-132. DOI: 10.7868/S003015741401002X
3. Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Сорохтин Н.О., Мороз Е.А. Геолого-геофизические исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-м рейсе научно-исследовательского судна "Академик Николай Страхов" в 2019 г. // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 334-336. <https://doi.org/10.31857/S0030157420010177>
4. Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Соколов С.Ю., Амбросимов А.К., Мелузов А.А., Мутовкин А.Д. Исследования в 38-м рейсе научно-исследовательского судна "Академик Николай Страхов" в Баренцевом море // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 885-887. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595885-887>
5. Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А., Семилетов И.П. Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе арктических морей // Океанология. 2022. Т. 62. № 1. С. 151-157. <https://doi.org/10.31857/S0030157422010014>

ПРЯМОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА В СУБМИКРОННОМ ДИАПАЗОНЕ РАЗМЕРОВ

Ревунова А.В.

*ИНОЗ РАН – СПБ ФИЦ РАН,
Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, 9, 196105
8 (812) 387-02-60 reina_abc@mail.ru*

DIRECT METHOD FOR SIZE COMPOSITION DETERMINATION IN THE SUBMICRON SIZE RANGE

Revunova A.V.

IL RAS – SPB FRC RAS

Всемирно признанным и самым распространённым методом определения гранулометрического состава мелких фракций донных отложений является лазерный анализ. Однако, этот метод не идеален. Авторы предлагают для анализа субмикронной фракции использовать прямой метод мембранной фильтрации.

The world-renowned and most common method for fine fractions size composition determining of bottom sediments is laser analysis. However, this method is not a perfect. The authors propose to use the direct membrane filtration for the submicron fraction analysis.

Лазерный анализ (ЛА) для целей гранулометрического анализа был описан в 70-х годах прошлого века [1,11]. Сейчас его широко используют для анализа гранулометрического состава в геологии, почвоведении, климатологии, экологии и тд [4,6,7]. Он основан на наблюдении, что угол отклонения лазерного луча частицей зависит от размера частицы и обратно пропорционален ему. В сложном образце, содержащем частицы разного размера, дифракция света приводит к определенной дифракционной картине. Для расшифровки данных, полученных прибором, используют несколько теорий. Наиболее распространенными моделями являются приближение Фраунгофера и модель Лоренца-Ми. Хотя с помощью последней можно получить значительно более достоверные результаты, особенно для очень мелких частиц (< 7,8 мкм), он все еще не используется в качестве стандарта. Недостатком этой модели является то, что для расчета требуется комплексный показатель преломления,

характеризующий оптические свойства минералов, содержащихся в образце. Поскольку в случае полиминеральных смесей это не может быть определено однозначно, а определение чрезвычайно трудоемко и дорого, обычно принимается приблизительное значение. В конечном счете, ни одна из моделей не дает истинного размера очень мелких частиц из-за:

- неидеальности формы природных частиц
- возможной (полу)прозрачности частиц
- метода отбора аликвоты и её объема
- различии при измерении одной пробы разными операторами и приборами
- зависимость результатов от изначальной степени сортированности пробы
- несопоставимости размеров препятствия с длиной волны лазера.

Известны исследования, в которых экспериментально доказано соответствие результатов измерения лазерным анализатором с гранулометрическим составом стандартных образцов [5], но в них авторы используют смеси с размерами частиц больше 3 мкм.

Параллельно распространены седиментационные методы определения гранулометрического состава в тонких фракциях: фракциометр и пипетка. Оба метода имеют нижнее ограничения по размеру определяемых частиц – 1 микрон [1]. Между тем, изучение фракции частиц менее 1 микрон необходимо из-за их высокой проникающей способности и большой поверхностной активности. Для разделения фракции меньше 1 микрона на подфракции авторами предлагается «доработанный» метод мембранной фильтрации. Он был предложен в 70-х годах прошлого века [2] однако широкого распространения не получил.

Согласно ГОСТ [1] фракция меньше 1 микрона остаётся во взвеси в верхних 5 см после суточного отстаивания предварительно обработанной перекисью водорода и прокипячённой навески в литровом цилиндре. Из верхнего слоя запаянным снизу шприцем отбиралось 20 мл и переносилось в воронку прибора вакуумного фильтрования (ПВФ). Для фильтрации последовательно использовались фильтр из трековой полиэтилентерефталатной мембраны с диаметром пор 2, 1, 0,4, и 0,2 мкм.

При проведении экспериментов в лаборатории ИНОЗ РАН было выявлено, что при фильтрации «в чистом виде» или с добавлением диспергатора (пирофосфат натрия) самый первый фильтр (диаметр пор 1 мкм) забивается, на его поверхности образуется плёнка, и частицы меньше 1 микрона не проходят в поры. В результате фильтры с более мелкими порами остаются почти пустыми. Для решения этой проблемы была

проведена серия сравнительных экспериментов, результаты которой показали, что при:

1. суточном выдерживании фильтров в 6%-ом растворе серной кислоты (H_2SO_4)
2. добавлении 100 мл 7-го раствора пирофосфата натрия ($Na_4P_2O_7$) непосредственно перед фильтрацией
3. вибрационном воздействии на воронку вакуумного насоса

обеспечивается максимальное прохождение частиц через поры фильтров.

Все эксперименты проводились в семикратной повторности на образцах с разными физико-химическими свойствами. Критерием успеха было уменьшение количества задерживаемых частиц на верхнем фильтре (контроль по весу) и отсутствие на его поверхности коллоидной плёнки и частиц диаметром меньше диаметра пор (визуальный контроль под микроскопом). Семикратная повторность позволяет нивелировать возможную погрешность весов.

В перспективе этот метод может быть расширен и перекрывать фракции, традиционно получаемые во время пипеточного анализа, так как на скорость оседания самых мелких фракции (5-1 мкм) влияют различные факторы, такие как форма частиц, неполное разложение органического вещества после обработки перекисью водорода [9], присутствие других агрегирующих комплексов (Fe и Mn -соединения) [10], электростатические силы и силы Ван-дер-Ваальса, Броуновское движение. Следовательно, расчёты, сделанные с помощью закона Стокса, становятся некорректными.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 12536-2014 Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Текст] взамен ГОСТ 12536-79. Введ. 2015-07-01. М.: Стандартинформ, 2015.
2. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах / Лисицын А.П..- М.: Наука. -1974.- 438 с.
3. Cornillault, J., Partile size analyzer. Applied Optics -1972.-11, 265–268.
4. Lehmkuhl F., Timing and spatial distribution of loess and loess-like sediments in the mountain areas of the northeastern Tibetan Plateau/ Frank Lehmkuhl, Philipp Schulte, Hui Zhao, [et al]. - Catena, -2014 117, 23–33
5. Jonkers L., Experimental insights into laser diffraction particle sizing of fine-grained sediments for use in palaeoceanography/ Lukas Jonkers, Maarten A. Prins, Geert-Jan A. Brummer [et al]. -Sedimentology, -2009- 56(7):2192 - 2206
6. Schulte P., Environmental change indicated by grain size variations and trace elements: examples from two different sections - the sandy-loess sediments

from the Doroshivtsy site (Ukraine) and the loess section Semlac (Romania). Philipp Schulte, Frank Lehmkuhl, Holger Kels, [et al]. -DUST2014 - 1st International Conference on Atmospheric Dust, 106–112

7. Sapelko, T.V. Correlating paleolimnological results with radiocarbon dating of Lake Ladoga sediment sequences/ Sapelko, T.V. Kuznetsov, D.D. Ludikova [et al]. Limnology and Freshwater Biology. -2022: -№4 (SI:Paleo2022)

8. Philipp Sh. Laser diffraction size analysis of loess-paleosol sequences – pretreatment, calculation, interpretation/ Philipp Sh.. RWTH Aachen University. *Dissertation*. Aachen. RWTH-2017-05571 2017

9. Vaasma, T., Grain-size analysis of lacustrine sediments: a comparison of pre-treatment methods./ Vaasma, T., -Estonian Journal of Ecology -2008.57, 231. doi:10.3176/eco.2008.4.01

10. von Lützw M., Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ludwig, [et al] -Journal of Plant Nutrition and Soil Science -2008. 171, 111–124. doi:10.1002/jpln.200700047

11. Weiss, E.L., Rapid analysis of particle-size distributions by laser light scattering. / Weiss, E.L., Frock, H.N., -1976.-Powder Technology 14, 287–293.

УДК 551.46.07

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ И РЕЛЬЕФА ДНА ЮЖНОГО ШЕЛЬФА КРЫМА В 124 РЕЙСЕ НИС «ПРОФЕССОР ВОДЯНИЦКИЙ»

**Пронин А.А.¹, Хортов А.В.¹, Мутовкин А.Д.¹,
Римский-Корсаков Н.А.^{1,2}**

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01, nrk@ocean

²МГТУ им.Н.Э.Баумана, Москва

SEISMO-ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF THE
SEDIMENTARY STRETCH AND BOTTOM RELIEF OF THE
SOUTHERN SHELF OF THE CRIMEA IN CRUISE 124 OF THE
R/V PROFESSOR VODYANITSKY

**Pronin A.A.¹, Hortov A.V.¹, Mutovkin A.D.¹,
Rimskiy-Korsakov N.A.^{1,2}**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS,
36 Nakhimovsky prosp., Moscow, 117997, Russia
8(499)124-13-01, nrk@ocean*

² *MSTU named after N.E. Bauman, Moscow*

В 2022 г были продолжены многолетние исследования по изучению строения дна, морфологии рельефа, экологии и новейшей истории шельфа полуострова Крым с использованием новых технологий гидролокации и акустического профилирования, разрабатываемых в Лаборатории гидролокации дна ИО РАН (ЛГД ИО РАН). Экспедиционные исследования проводились в рамках 124 рейса НИС «Профессор Водяницкий» ФИЦ ИнБЮМ, проходившего с 27 сентября по 22 октября 2022 г.

In 2022, long-term studies were continued to study the bottom structure, relief morphology, ecology and recent history of the shelf of the Crimean Peninsula using new sonar and acoustic profiling technologies developed at the Seabed Sonar Laboratory of the IO RAS (LSD IO RAS). Expeditionary research was carried out within the framework of cruise 124 of the R/V Professor Vodyanitsky of the Federal Research Center of the InBYuM, which took place from September 27 to October 22, 2022.

Учитывая ограниченный район работ, доступный в 2022 г (от бухты Ласпи до Феодосийского залива), основное внимание, при экспедиционных исследованиях было уделено акустическому профилированию толщи донных отложений и развитию технологии их обработки, с особым вниманием, к взаимосвязи материалов акустического профилирования и других геофизических методов изучения строения дна. При выборе положения съёмочных галсов учитывались полученные нами ранее профили НСП, АП и ГБО, а так же опубликованные и фондовые материалы ряда специализированных организаций. Так же, большое внимание, было уделено непосредственно технологии обработки данных – возможности конвертации данных в различные форматы, в том числе общепринятые, с

целью использования известных программных продуктов для обработки геофизических данных и их сейсмостратиграфическому анализу.

На рис. 1 представлена схематическая карта расположения галсов акустического профилирования выполненных в 124 рейсе с помощью нового акустического профилографа АП-5Т и галсы НСАП, полученные с помощью сейсмоакустического комплекса «Геонт шельф» в 116 рейсе НИС «Профессор Водяницкий».

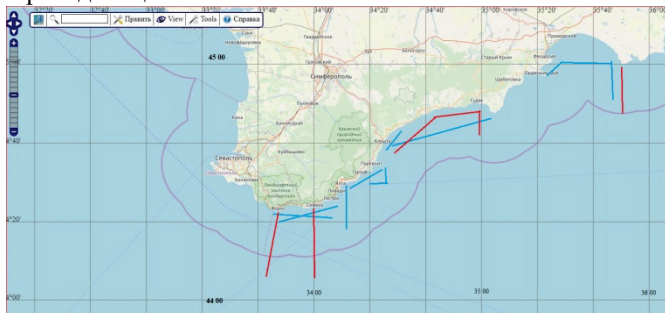


Рис. 1. Схема расположения галсов акустического профилирования профилографом АП-5Т – синий цвет и галсы НСАП, выполненные комплексом «Геонт-Шельф» в 116 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» - красный цвет.

В том и другом случае параллельно выполнялся эхолотный промер. Таким образом, был получен комплекс геофизических данных характеризующий ключевые районы шельфа Южного берега Крыма. Высокочастотное акустическое профилирование дополняло и детализировало данные НСАП.

На рис. 2-4 представлен пример представления данных съёмки акустического профилографа 2022 г. Общее представление о районе работ и характере дна, дает сводный эхолотный профиль. Построить сводный композитный профиль акустического профилирования можно, но нецелесообразно, в таком масштабе будут не видны многие важные характерные детали, поэтому такие профили, на основе файлов формата SEG, строятся из нескольких частей

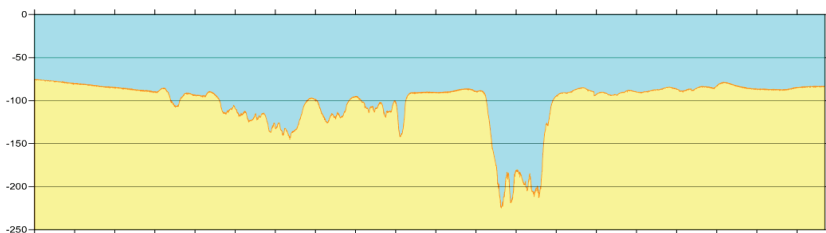


Рис. 2. Сводный эхолотный профиль Алушта-Меганом, глубины и дистанция в метрах

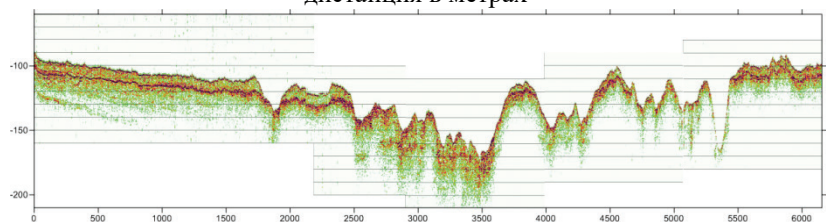


Рис. 3. Композитный профиль по разрезу «Алушта-Меганом», часть 1. Глубины в метрах, дистанция в у.е.

Более детальная информация содержится в профилях, построенных на основе файлов формата XTF (см. рис. 4) и, соответственно эти профили строятся еще более мелкими фрагментами.

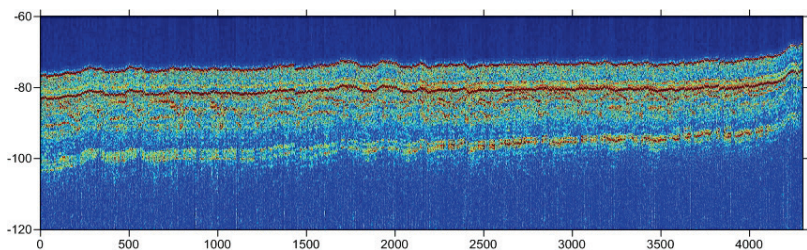


Рис. 4. Композитный профиль Алушта-Меганом, часть 1А

Используя графические материалы, построенные на основе файлов формата XTF можно увидеть и продемонстрировать многие интересные явления и геоморфологические формы, наблюдаемые на шельфе. В частности, хорошо видны проявления газовыделения в осадочной толще, аккумулятивные клиноформы, погребенную речную сеть.

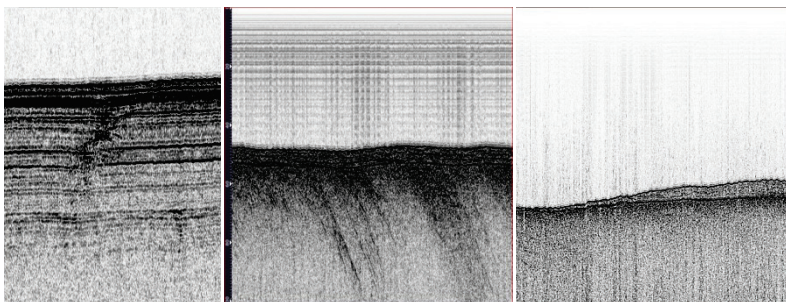


Рис. 5. Фрагменты записей акустического профилирования, показывающие – канал выхода газа в толще ДО (слева), антиклинальная складчатость (центр), аккумулятивная клиноформа
 Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема FMWE-2021-0010)

ЛИТЕРАТУРА

1. Мутовкин А.Д., Пронин А.А., Хортов А.В. Сейсмоакустические исследования плейстоцен-голоценовых отложений Крымско-Керченского шельфа // В сборнике: Геология морей и океанов. Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. 2022. С. 295-298.
2. Пронин А.А. Технические аспекты постобработки материалов акустического профилирования толщи донных отложений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 12. С. 44-49.
3. Мысливец В. И. и др. Морфоструктура и строение осадочного покрова внутреннего шельфа Западного Крыма. //ОКЕАНОЛОГИЯ, 2019, том 59, № 6, с. 1063-1073.
4. Анисимов И.М., Лесин А.В., Пронин А.А., Мутовкин А.Д. Однолучевое эхолотирование и акустическое профилирование при исследованиях донного рельефа полуострова Крым // В сборнике: Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021). Материалы XVII международной научно-технической конференции. Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН. 2021. С. 236-238.
5. Римский-Корсаков Н.А., Бурдиян Н.В., Пронин А.А. Комплексные геолого геофизические исследования в 115 рейсе НИС «Профессор Водяницкий» на шельфе полуострова Крым // В сборнике: Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021) Материалы XVII международной научно-технической конференции. 2021. Т. I. С.247 – 250.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

УДК 004.042

О СОЗДАНИИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ОКЕАНА

Вязилов Е. Д.¹, Михеев А. С.¹, Мельников Д. А.¹

¹ ВНИИГМИ-МЦД, Королева, 6, 249035, г. Обнинск. 84843974676.
vjaz@meteo.ru

ABOUT DEVELOPMENT OF DIGITAL TWIN FOR OCEAN

Viazilov E.¹, Mikheev A.¹, Mtknikov D. A.¹

¹ RИHMI-WDC. Koroleva, 6, 249035, Obninsk

Показана актуальность создания цифрового двойника океана. Выработаны требования к нему. Рассмотрена модель данных для цифрового двойника. Разработаны подходы по созданию и использованию цифрового двойника. Подготовлен примерный состав данных для цифрового двойника океана.

The relevance of creating a digital twin for the ocean presented. Requirements for digital twin developed. The data model for the digital twin is considered. Approaches proposed to create and use a digital twin for the ocean. An approximate composition of digital twin data reviewed for digital twin.

Для прогноза изменений климата, моделирования влияния воздействий среды на жизнедеятельность населения, промышленные предприятия требуется использовать данные из различных доменов. Информационное обеспечение должно быть ориентировано не только на определенные классы пользователей, но и на отдельные бизнес процессы, например, проектирование и эксплуатация буровых скважин, планирование промысла рыбных объектов, поиск рыбы и сам вылов. Требуется активный обмен данными между различными информационными системами и программными компонентами. В информационных системах содержатся не гармонизированные данные. Данные и информация распределены по различным доменам и неоднородны как по используемым системам управления данными, структурам данных, классификаторам, не имеют

унифицированных имен. Все это требует развития новой архитектуры данных в виде цифрового двойника (ЦД).

Предпосылками создания ЦД океана являются существующие численные модели гидросферы, атмосферы, разработанные в разных странах. 20 лет назад в РАН был проект под названием «Электронная Земля», который дал сильный толчок по использованию геоинформационных систем. Во многих странах созданы цифровые модели местности и цифровые модели рельефа. Компания Nvidia собирается создать виртуальную копию планеты со всеми ее природными и рукотворными процессами, а затем моделировать потенциальные климатические изменения [1]. Цифровую платформу «Арктик Лабс» создает МГУ им. М.В.Ломоносова по заказу Минвостокразвития России. Эта платформа - основа ЦД Северного морского пути будет включать динамическую математическую модель, позволяющую разрабатывать сценарии развития Арктики и отдельных территорий, логистических маршрутов. В Государственной корпорации «Роскосмос» создается платформа для сбора, обработки, хранения и распространения данных дистанционного зондирования Земли и реализуется проект «Цифровая Земля».

Что такое цифровой двойник? ЦД наиболее активно начали развиваться для производственных изделий [2]. В настоящее время имеется несколько определений ЦД.

ЦД изделия – система, состоящая из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями [3].

ЦД – цифровая модель конкретного физического объекта или процесса с подключенными наборами данных, которая обеспечивает конвергенцию между физическим и виртуальным состояниями с соответствующей скоростью синхронизации [4].

ЦД предприятия – модель, максимально точно описывающая реальные причинно-следственные зависимости между производственными, экономическими, финансовыми показателями предприятия и внешними воздействиями.

ЦД – технология создания цифровых (виртуальных) моделей физических объектов, моделирующих внутренние процессы, технические характеристики и поведение реальных объектов в условиях воздействий помех и окружающей среды.

ЦД Земли – информационная система, которая предоставляет пользователям цифровую копию состояния и временной эволюции системы Земли, ограниченную доступными наблюдениями и законами физики (Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды). Модели должны

позволить описывать поведение объектов природы и взаимодействующих с ними реальных объектов экономики, включая воздействия опасных явлений на промышленные предприятия и население. В этом направлении тоже активно ведутся исследования [5, 6]. Последнее определение наиболее полно подходит к ЦД океана.

ЦД в первую очередь должен отражать свойства океана. Эти свойства отражаются как: цифровая тень, которая показывает различные измеренные свойства физического объекта; цифровой продукт - получается на основе значений измеренных свойств физического объекта и или вычисляется на основе модели поведения объекта и ЦД - позволяет на основе интерполированных значений свойств физического объекта и моделей предсказать поведение океана.

С помощью ЦД можно моделировать возможные ситуации, связанные, например, с ростом уровня Мирового океана; прогнозировать различные погодные, геофизические явления на основе данных ЦД; оценивать возможные воздействия опасных явлений на предприятия с помощью различных моделей; моделировать воздействия промышленных объектов на океан.

ЦД океана должен предоставлять: свойства конкретных объектов и или процессов для последующего моделирования или прогноза; средства управления данными, включая сбор, обмен, каталогизацию, хранение, агрегацию, визуализацию результатов компьютерного моделирования и их анализ; средства управления программным обеспечением компьютерного моделирования.

Модель данных цифрового двойника океана. Создание ЦД это новый этап развития баз данных, направленный на интеграцию данных из доменов. ЦД включает инфраструктуру, набор программных средств, процедур, правил, с помощью которых автоматически обрабатываются данные.

Основной единицей управления данными должен стать минимальный объект мира, структура которого стандартизована на ведомственном, национальном или международном уровнях. База данных ЦД должна хранить свойства множества независимых, но связанных между собой объектов в океане, использовать Единый словарь параметров для описания объектов и событий.

Модель данных должна удовлетворять следующим требованиям: учитывать принципы FAIR (поисковость, доступность, интероперабельность и повторное использование); обладать расширяемостью по содержанию данных; сохранять целостность при добавлении новых объектов, экземпляров, связей; не зависеть от используемых систем управления данными и операционных систем;

хранить историю жизни всех объектов ЦД; давать доступ к ЦД, используя интерфейсы прикладного программирования (API), Representational State Transfer (REST). Каждый объект должен иметь идентификатор, с помощью которого можно найти любой объект ЦД.

ЦД должен включать метаданные, данные в узлах регулярной сетки, социально-экономическую, технико-экономическую, гидрографическую информацию, справочные сведения, сведения о воздействиях окружающей среды на промышленные предприятия и население, а также рекомендации для принятия решений.

Средства навигации по ЦД должны иметь наглядную схему состава объектов и их связей между собой. Вход в ЦД может начинаться с любого объекта, а далее по ссылкам потребитель может перейти в другие объекты или запустить тот или иной сервис. При этом вся навигация должна строиться на основе метаданных.

Выводы. Пока нет единого источника данных, в котором было бы представлено хотя бы около 50% необходимых пользователям данных об океане. Для ЦД требуется найти существующие источники данных и организовать для них включение в ЦД.

Благодарности. Исследование проведено в рамках программы «Цифровой двойник Каспийского моря», осуществляемой в рамках деятельности МОК ЮНЕСКО, связанной с Десятилетием наук об океане в интересах устойчивого развития ООН (2021-2030 гг.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Билык К. NVidia создаст цифрового двойника Земли на суперкомпьютере для прогнозирования изменений климата. Раздел «Новости». 2021. <https://rb.ru/news/nvidia-supercomputer-climate/>
2. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. Научный редактор профессор А. Боровков. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
3. ГОСТ Р 57700.37:2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения». – М.: Российский институт стандартизации. - 15 с.
4. ISO 23247-2:2021. Automation systems and integration. Digital twin framework for manufacturing — Part 2. Reference Architecture. – 12 p.
5. Blair G. Digital twins of the natural environment. 2021. Patterns. №2, October 8, 3 p. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100359>
6. Bauer P., Stevens B. & Hazeleger W. A digital twin of Earth for the green transition. Natural Climate Change. 2021. №11. pp. 80–83. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-00986-y>

О МОНИТОРИНГЕ ЦИКЛОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЕСИМО

Вязилова Н.А.

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
гидрометеоинформации-Мировой Центр Данных», г.Обнинск, ул.
Королева, д.6, 249035, 499- 795- 21-9 nav@meteo.ru

ON THE CYCLONE ACTIVITY MONITIRING IN NORTH ATLANTIC BASED ON ESIMO INDICATORS

Viazilova N.A.

*All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World
Data Center, 6, Korolyov St., Obninsk, 249035*

Мониторинг циклонической активности в Северной Атлантике проводится на основе представленных на портале ЕСИМО ежемесячных карт пространственного распределения и графиков временного изменения траекторий циклонов, индекса циклонической активности, количества центров циклонов.

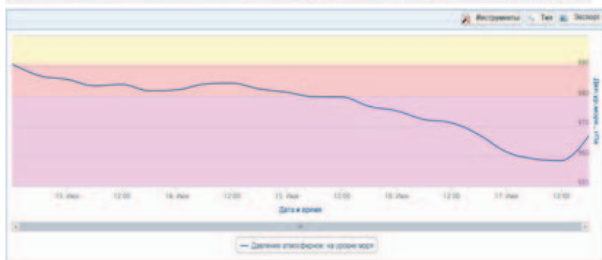
The cyclone and storm activity monitoring in North Atlantic is presented on the ESIMO portal in the form of monthly maps and graphs of changes in the number of cyclone trajectories, number of cyclone centers and index of cyclone activity.

Мониторинг циклонической и штормовой активности в Северной Атлантике и Европе включает представление на портале ЕСИМО карт траекторий циклонов, построенных по 6 – часовым данным реанализа NCEP-DOE [1] за последний календарный месяц, с указанием атмосферного давления, скорости максимального ветра и интенсивности осадков в центрах циклонов (рис.1). Положение центров циклонов и траектории их смещения рассчитываются по данным атмосферного давления на уровне моря (MSLP) с использованием метода автоматической идентификации [2,3]. Для расчета параметров циклонической активности отбираются только циклоны с продолжительностью жизни от 12 часов и более.

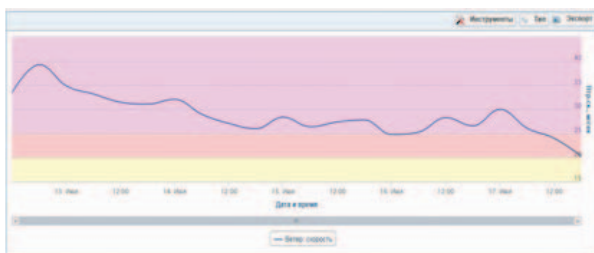
а)



б)



в)



г)

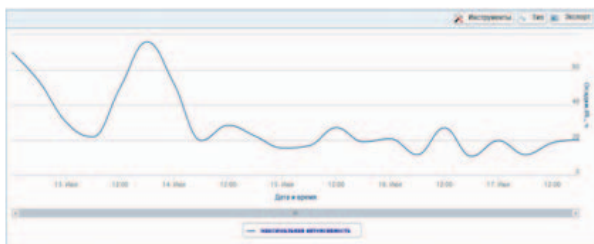


Рис. 1. Пример представления на портале ЕСИМО траектории шторма, вышедшего на территорию России в июле 2022г.: а) положение центров циклона, б) изменение атмосферного давления в центрах, в) изменение максимальной скорости ветра, г) изменение интенсивности осадков (мм/сутки) в циклоне.

Кроме траекторий на портале ЕСИМО представлены карты пространственного распределения интегральных значений (за календарный месяц) количества центров циклонов и индекса циклонической активности, представляющего сумму аномалий давления в центрах циклонов (рис.2).

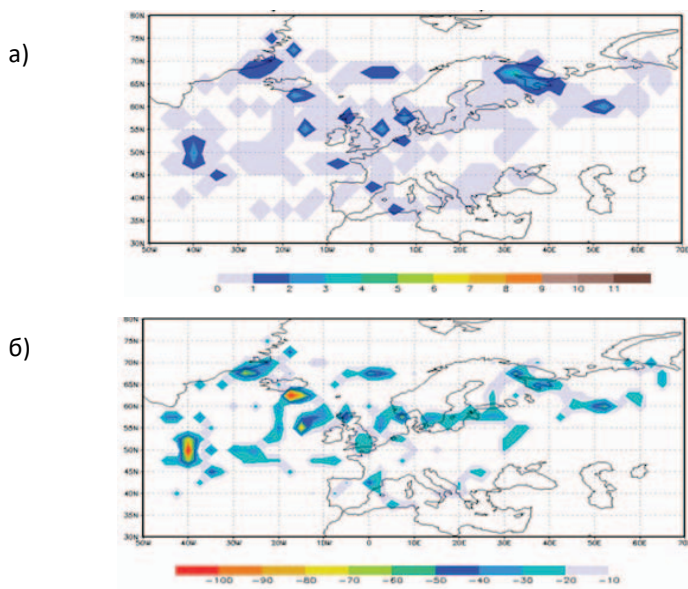


Рис. 2. Пример представления на портале ЕСИМО карт пространственного распределения ежемесячных интегральных характеристик циклонической активности: а) количества центров циклонов; б) индекса циклонической активности. Июль 2022г.

Для всего исследуемого региона, а также для отдельных выделенных районов,- Балтийского и Баренцева морей, Арктической зоны РФ, - рассчитываются интегральные ежемесячные региональные показатели количества траекторий циклонов, центров циклонов, индекс циклонической активности. Средствами интерфейса можно получить графики их временного изменения. за период с 1999г. по настоящее время.

Для оценки штормовой активности в выделенных районах по значениям максимальной скорости ветра в центрах циклонов для каждого календарного месяца рассчитывается повторяемость центров циклонов по градациям скорости ветра по шкале Бофорта (рис.3).



Рис. 3. Пример повторяемости количества центров циклонов по градациям скорости ветра (шкале Бофорта) в районе Балтийского моря. Июль 2022 г.

Ежемесячные показатели циклонической и штормовой активности дают возможность получить оценку циклонической активности на акватории Северной Атлантики, территории Европы, в том числе на европейской части России и в субполярных арктических районах РФ, в любой календарный месяц. Представленные в данной работе карты и графики позволяют отметить повышенную циклоническую и штормовую активность в июле 2022 г на акватории Атлантики, а также в районе Балтийского моря и в северо-западном районе РФ. Ежемесячные значения показателей, рассчитанных за весь период исследования с 1979 г., дают возможность получить климатические характеристики циклонической и штормовой активности в исследуемом регионе и показать особенности ее межгодовой изменчивости. Анализ таких характеристик представлен в целом ряде работ автора настоящей статьи, в том числе и в работах [2, 3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Kanamitsu, M., W. Ebisuzaki, J. Woollen, S.-K. Yang, J. J. Hnilo, M. Fiorino, and G. L. Potter. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) // Bull. Amer. Meteor. Soc., 2002, vol. 83, pp. 1631–1643.
2. Вязилова Н.А. Циклоническая активность и колебания циркуляции в Северной Атлантике // Метеорология и гидрология, 2012, N 7, с.5-14.
3. Viazilova N. A. and Viazilov A E. On climatology of storm cyclones entering European region of Russia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. Vol. 611, no 1. 012004.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНЫХ ТИПОВ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ В ЦЕЛЯХ НАУЧНОГО ОПЕРАТИВНОГО
СОПРОВОЖДЕНИЯ ПРОМЫСЛА ПЕЛАГИЧЕСКИХ ВИДОВ РЫБ
В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА**

Устинова Е.И., Филатов В.Н., Басюк Е.О.

*Тихоокеанский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (ТИНРО), пер. Шевченко, 4, 690091 Владивосток, 8(423)2604530
elena.ustinova@tinro-center.ru*

**USING OF VARIOUS TYPES OF OCEANOGRAPHIC INFORMATION FOR
THE PURPOSES OF OPERATIONAL SCIENTIFIC SUPPORT
OF THE PELAGIC SPECIES FISHERY
IN THE NORTHWESTERN PACIFIC**

Ustinova E.I., Filatov V.N., Basyuk E.O.

Pacific branch of Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (TINRO), Shevchenko Alley, 4, 690091 Vladivostok

В работе анализируется практический опыт использования различных типов океанографической информации в период научного оперативного сопровождения промысла сайры, сардины и скумбрии в северо-западной части Тихого океана. Оцениваются преимущества и недостатки оперативной информации.

In the paper the practical experience of using of various oceanographic information in the period of the operational scientific support of the pelagic species (saury, sardine and mackerel) fishery in the Northwestern Pacific is analyzed. The advantages and disadvantages of this operational information are assessed.

На современном этапе оперативное научное сопровождение промысла пелагических видов рыб (сайры, сардины-иваси, скумбрии) в северо-западной части Тихого океана опирается на несколько типов океанографической информации. Это данные, полученные как *in situ*, так и дистанционно. Ежегодно в июне НИС ТИНРО выполняют

крупномасштабную комплексную съемку этого района, включающую океанографические STD-измерения, траловую, планктонную и акустическую съемки, и в отдельные годы или периоды лет - меньшую по площади съемку в конце лета и начале осени. В период промысла сбор информации о температуре поверхности океана (ТПО) осуществляется с тех бортов промысловых судов, которые оборудованы высокоточным датчиком температуры, а также силами научных наблюдателей, находящихся на промысловых судах. В последние годы с резким сокращением сайрового промысла количество таких данных так же резко сократилось, так как именно на сайровом промысле суда были оборудованы программно-аппаратным комплексом "ТермоПромПланшет" с соответствующими датчиками. Это создает проблемы в периоды быстрого изменения ТПО (например, под воздействием тайфуна или глубокого циклона), особенно заметные осенью.

К данным дистанционного зондирования, используемым в оперативном сопровождении промысла, относятся температурные и альтиметрические данные из официальных источников. Это ежедневные спутниковые данные СахНИРО, ежедневные данные по ТПО высокого разрешения ($0,1 \times 0,1^\circ$) Японского метеорологического агентства (JMA) с сайта международного проекта NEAR-GOOS (<https://ds.data.jma.go.jp/gmd/goos/data/rrtdb/jma-pro.html>, последнее обращение 28.12.2022), а также данные о течениях, рассчитываемых в лаборатории промысловой океанографии ТИНРО по методике OSCAR (https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg, последнее обращение 28.12.2022).

В оперативной работе используются выявленные многолетними исследованиями закономерности воздействия изменений и изменчивости окружающей среды на сезонные миграции, пространственное распределение и формирование промысловых скоплений сайры, сардины и скумбрии [1-4]. В частности, влияние межгодовой, сезонной и мезомасштабной изменчивости, а также роль вертикальной структуры, характеризующейся определенными параметрами (такими, как толщина верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), вертикальные градиенты в пикноклине и др.) были обнаружены в период выполнения научной программы ТИНРО "Полигон" в 1978-1990 гг. (судовые съемки высокого разрешения 3-5 судами одновременно с сопровождением спутникового мониторинга и авиаразведки). Эта программа позволила выявить условия, способствующие необходимой концентрации кормового зоопланктона.

Влияние изменений океанографических условий на распределение сардины, скумбрии и сайры в СЗТО проявляется через изменения путей и скорости сезонных миграций, связанных с динамикой вод и фронтальных

разделов. Современные данные альтиметрии и течения, рассчитываемые на этой основе, помогают выявлять наиболее существенные для промысла вихри и степень развития ветвей основных течений данного района. Температурные аномалии наиболее показательны в тех случаях, когда они вызваны динамическими факторами.

В последние годы из-за смещения основных скоплений сайры на восток и север промысловый планшет (основной ежедневный оперативный продукт, распространяемый потребителям) был расширен до 53° с.ш. и 173° в.д. Во время проведения съемок судами ТИНРО их позиции наносятся на планшет (рис. 1). Данные вертикального зондирования НИС ТИНРО позволяют оценить текущую ситуацию и тенденции ее развития более корректно и комплексно.

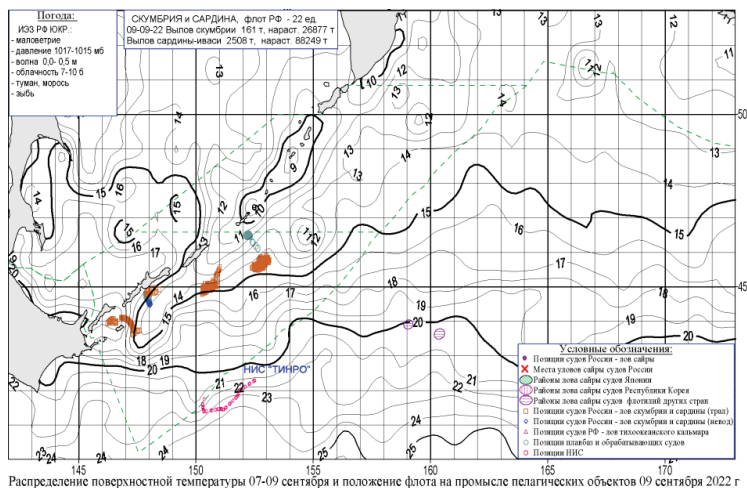


Рис. 1. Промысловый планшет за 9 сентября 2022 г. с нанесенными позициями НИС «ТИНРО»

Июньская съемка охватывает большую часть крупномасштабного западного субарктического циклонического круговорота, элементы которого оказывают существенное влияние на миграции сардины, сайры и скумбрии. Траловые и акустические данные помогают сформировать представление о сроках и темпах миграций этих видов в субарктические воды СЗТО. В осенний период по данным съемок оценивается интенсивность сезонного охлаждения, увеличение толщины ВКС, уменьшение градиентов в пикноклине, размывание фронтов на севере и другие сезонные изменения, влияющие на промысловую обстановку.

В современный период наиболее актуальной проблемой является возобновление сайрового промысла, который резко сократился в последние 3 года. В связи с произошедшей перестройкой миграций сайры и последующим сокращением количества добывающих судов необходимо осуществлять предварительную оценку океанологической и промысловой ситуации и усиливать информационное сопровождение промысловой экспедиции в первую половину сайровой путины. Было бы целесообразно проводить такую работу с помощью судна, имеющего соответствующее промысловое и световое вооружение (например, НИС "Владимир Сафонов"), именно в начале путины, когда промысловая ситуация не ясна, и промысловая экспедиция остро нуждается в помощи. По срокам это конец июля - начало августа.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- 1 Байталоук А.А., Филатов В.Н. Условия формирования промысловых скоплений сайры в зонах с различной вертикальной структурой вод у южных Курильских островов // Известия ТИНРО. - 1999. - Т. 124. - С. 526-531.
- 2 Филатов В.Н. Миграции и формирование скоплений массовых пелагических гидробионтов (на примере тихоокеанской сайры) – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2015. – 168 с.
- 3 Филатов В.Н. Океанологические и гидробиологические особенности формирования скоплений нагульной сайры в водах Курильских островов // Результаты исследований по прогнозированию промысловой обстановки на Дальнем востоке. – Владивосток: Изд-во ТИНРО, 1989.- С. 5-16.
4. Филатов В.Н., Старцев А.В., Устинова Е.И., Еремин Ю.В. Тихоокеанская сайра. Научно-информационное обеспечение промысловой экспедиции – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2011. – 120 с.

**АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ
ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОСАДКОВ ВО ФРАКЦИИ
>0.1 ММ ПО МИКРОФОТОГРАФИЯМ С ПРИМЕНЕНИЕМ
СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ.**

Голиков В.А.¹, Криницкий М.А.², Борисов Д.Г.²

¹ *Московский физико-технический институт, 141701,
Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9,
8(495)408-45-54, info@mipt.ru*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01,
resty@mail.ru*

**ALGORITHM FOR AUTOMATIC EVALUATION OF
PALEOINDICATORS FROM MICROPHOTOGRAPHY OF MARINE
SEDIMENT PARTICLES USING UNSUPERVISED DEEP
LEARNING METHODS.**

Golikov V.A.¹, Krinitskiy M.A.², Borisov D.G.²

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology,
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701*
² *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997*

В статье представлен алгоритм для автоматической кластеризации зерен донного осадка на основе методов глубокого обучения. Кластеризованная выборка частиц позволяет специалисту быстрее и эффективнее выполнять оценку вещественного состава осадка в грубой фракции.

Paper presents an algorithm for automatic classification of marine sediments based on deep learning methods. For a classified sample of particles, it is possible to automatically calculate paleoindicators.

Дно морей и океанов покрыто мощным слоем донных осадков. Ученые изучают материал, накопленный на морском дне в течение тысяч и миллионов лет, как летопись изменений изменения условий на суше и в океане. Методы расшифровки осадочных записей и реконструкции

геологического прошлого у исследователей разнообразны. Изучение состава донных отложений в крупной фракции (частицы размером более 0.063 мм) является достаточно старым, но все еще широко используемым методом распознавания древних обстановок. Этот подход предоставляет, среди прочего, информацию о минеральном составе и источниках осадочного вещества, доминирующих процессах и условиях осадконакопления. Исследователи используют специфические индикаторы, маркирующие ту или иную экологическую обстановку в прошлом: специфические минеральные ассоциации, соотношение между биогенными и терригенными частицами, соотношение между раковинами планктонных фораминифер (одноклеточных организмов) и их фрагментами и др.

Перед анализом образцы донных отложений, полученные с морского дна с помощью различных пробоотборников, должны быть промыты через сито с размером ячеек 0.063 мм или 0.1 мм и высушены. Затем специалист изучает и классифицирует частицы под бинокулярным микроскопом. Обычно он не может классифицировать все частицы, содержащиеся в пробе, в выборку. Исследуется небольшая квартованная выборка зерен (>300 зерен). Однако очевидно, что с уменьшением количества частиц в выборке, ее репрезентативность также снижается. Эта работа очень трудоемка и негативно сказывается на здоровье специалиста из-за высокой зрительной нагрузки (работа с оптическим микроскопом признана вредными условиями труда). Наконец, работа требует наличия высококвалифицированных специалистов, которых всегда не хватает, а на подготовку новых специалистов уходит большое количество времени.

По всем вышеперечисленным причинам целью данной статьи является упрощение работы ученых путем создания алгоритма автоматической классификации частиц во фракции > 0.1 мм. Однако, ввиду отсутствия уже классифицированного набора данных, необходимого для оптимизации большинства методов классификации мы будем решать поставленную задачу в подходе кластеризации. Цель – разбить целевой набор данных (частиц осадка) на группы семантически похожих друг на друга зерен (кластеры). Такой подход не требует наличия размеченной выборки. Имея безымянные кластеры, содержащие однотипные объекты, опытный специалист может маркировать их, создавая тем самым размеченный набор данных о частицах морских донных отложений. Этот набор данных впоследствии может стать основой для создания полностью автоматизированного алгоритма классификации.

В данном исследовании представлен алгоритм обработки цифровых микрофотографий частиц донных осадков, позволяющий автоматизировать разбиение этих частиц на семантически однородные группы для дальнейшего изучения экспертом. Также представлено сопоставление

результатов кластеризации с результатами визуального анализа и с рентгеноструктурного анализа (XRD).

Сначала, поднятые с морского дна, прошедшие через сито, высушенные и выложенные на контрастную подложку электронного микроскопа частицы фотографируются с увеличением в 80 крат. На полученных изображениях разрешением 1280x1024 пикселей с множеством частиц выделяются и вырезаются отдельные зерна. Для этого применяется классический алгоритм машинного обучения SLIC (Simple Linear Iterative Clustering) [2]. В этом методе предлагается особая мера расстояния, учитывающая расстояния в пространстве цвета и изображения. Используя SLIC, мы разделили каждое изображение на множество однородных сегментов, называемых суперпикселями, с достаточной точностью и низкими вычислительными затратами. Некоторые суперпиксели обрамляют фон, а другие обрамляют визуальное представление частиц. Разделение суперпикселей происходит по их средней цветовой насыщенности (Saturation в цветовой модели HSV), ярко зеленые сегменты подложки имеют значительно большее значение насыщенности, чем сегменты частиц. Выявленные суперпиксели частиц обрамляются прямоугольником и вырезаются. Таким образом получается набор данных из 14215 отдельных частиц.

Для кластеризации частиц выбран алгоритм SPICE (Semantic Pseudo-labeling-based Image Clustering) [3] с лучшим качеством работы на многих оценочных наборах данных. Метод состоит из двух основных частей. Первая часть извлекает семантические признаки изображений, преобразуя изображения в низкоразмерное пространство, в котором расстояние между векторами частиц говорит об их семантической схожести. Вторая часть кластеризует полученное низкоразмерное пространство признаков, присваивая каждой частице номер кластера, которому она принадлежит. Весь процесс обучения алгоритма происходит без привлечения учителя на неразмеченных данных.

Далее, обученный алгоритм был применен к той же выборке, на которой он оптимизировался. Разделенные на три группы частицы были просмотрены специалистом и классифицированы. Таким образом, каждое зерно из набора данных принадлежит одному из трех классов: кварц, фораминиферы, глауконит. Примеры изображений из каждого класса приведены на рис. 1.

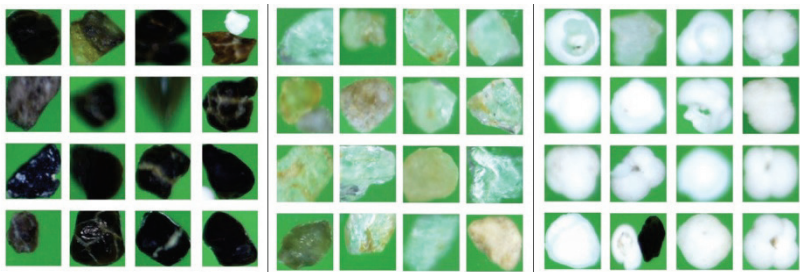


Рис. 1. Примеры изображений частиц из каждого из трех классов. а) темноцветные частицы (слева), б) прозрачные частицы (по центру), в) фораминиферы и фрагменты их раковин (справа).

Наконец, зная количество частиц в каждом классе можно легко получить количественные соотношения размеров трех классов, и сравнить их с результатами, которые получены в ходе визуального анализа (вручную, под бинокулярным микроскопом) и с данными рентгеноструктурного анализа (таблица 1). Для геологической интерпретации данных кластеризации следует использовать данные рентгеноструктурного анализа

	XRD- дифрактометрия	Визуаль ный анализ	Наш метод
Кварц	23%	49%	24,6%
Форамин иферы	43,3%	33%	42,8%
Глаукон ит	32,5%	17%	32,6%

Таблица 1 Сравнение результатов кластеризации с результатами визуального и рентгеноструктурного анализа. Прозрачные зерна – кварц, Темноцветные зерна – глауконит, Фораминиферы – кальцит.

В данный момент ведется работа, по созданию клиент-серверного приложения для более удобного применения представленного алгоритма палеоокеанологами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Achanta R. и др. Slic superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Т. 34. № 11. С. 2274–2282.
2. Niu C., Shan H., Wang G. Spice: Semantic pseudo-labeling for image clustering // IEEE Transactions on Image Processing. 2022. Т. 31. С. 7264–7278.

УДК 551.501.6

ИДЕНТИФИКАЦИЯ АНОМАЛИЙ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ВЕТРА И КОНЦЕНТРАЦИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Касаткин А. Я.¹, Криницкий М. А.^{1,2}, Гулев С. К.²

¹ *Московский физико-технический институт,
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141701, 8(495)408-
45-54, info@mipt.ru*

² *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, 8(499)124-13-01, resty@mail.ru*

**IDENTIFICATION OF ANOMALIES IN HIGH-FREQUENCY TIME SERIES
OF WIND SPEED AND GREENHOUSE GASES CONCENTRATION
MEASUREMENTS USING MACHINE LEARNING METHODS**

Kasatkin A.J.¹, Krinitskiy M.A.^{1,2}, Gulev S. K.²

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, 9 Institutskiy per., Dolgoprudny,
Moscow Region, 141701*

² *P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

В докладе представлены методы идентификации аномалий в высокочастотных временных рядах. Обсуждаемые методы: метод на основе авторегрессии ARIMA, с использованием библиотеки catboost, метод на основе модели Random Forest, LSTM и многослойный перцептрон.

In this study, we present methods for anomalies identification in high-frequency time series. Discussed methods: ARIMA autoregression method, method using Catboost library, method based on Random Forest model, LSTM neural network and multilayer perceptron.

Современные высокочастотные измерения характеризуются наличием выбросов (аномалий), часть из которых существенно влияет на качество оценки агрегированных параметров среды. Примером натуральных наблюдений такого рода могут служить измерения солёности поверхности океана, скорости и направления течений, скорости и направления ветра, концентрации парниковых газов, etc. При этом вычисление агрегированных параметров среды, таких как потоки солёности или потоки газовых примесей производится с применением предварительной фильтрации выбросов [1]. В настоящее время отсев выбросов производится с применением сложного сочетания эмпирически настраиваемых примитивных фильтров, что зачастую приводит к существенному снижению объема полезных данных. В то же время современные методы машинного обучения предоставляют расширенные возможности адаптивной и гибкой идентификации аномалий с повышенной точностью по сравнению с классическими статистическими фильтрами.

В настоящем исследовании предлагается решать задачу фильтрации аномалий с помощью методов машинного обучения. Основной сложностью в таком подходе становится отсутствие обучающей выборки для применения методов контролируемого обучения (supervised learning). В то же время, даже в случае наличия обучающей выборки, суть аномалий как чрезвычайно редких объектов, приводит к проблеме сильно несбалансированной выборки для обучения бинарного классификатора. В связи с этим в настоящем исследовании предлагается применять методы «обучения без учителя» (unsupervised learning), а именно методы идентификации аномалий.

В настоящем исследовании мы разрабатываем подход фильтрации выбросов для данных натуральных высокочастотных измерений концентрации CO₂, водяного пара и вертикальной компоненты скорости ветра, получаемых на станции оценки потоков парниковых газов методом ковариации турбулентных пульсаций (далее ковариационная станция). В качестве исходных данных используются показания, записанные в виде 48 файлов по 30 мин (в общей сложности 1 день), каждый из которых содержит 36000 измерений с интервалом 0.05 секунды. В данных содержится информация о приборе, времени и анализируемых параметрах среды. Под аномалиями (идентифицируемыми объектами) понимаются

точки, которые не укладываются в общий тренд или закономерность, наблюдаемую на существенном (более 3-5 секунд) интервале измерений. Примеры событий, считающихся аномальными при разметке, приведены на рис. 1.

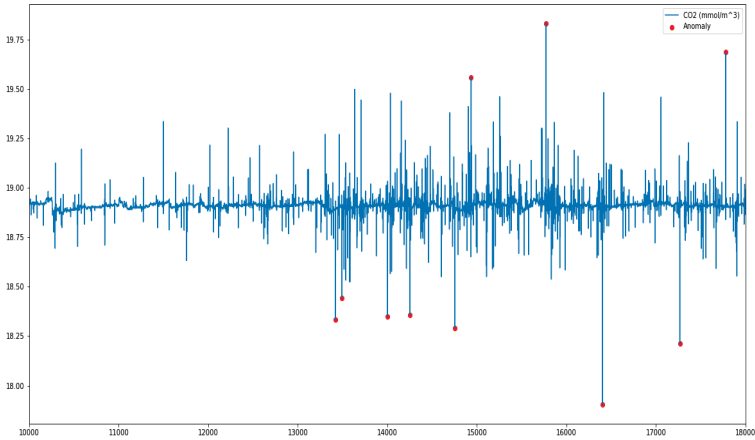


Рис. 1. Пример аномалий, отмеченных во временном ряде концентрации CO2. Здесь синей линией отображен график концентрации CO2, красными точками отмечены выделенные экспертом аномалии.

Предлагаемый метод поиска аномалий заключается в прогнозировании временных рядов с помощью моделей машинного обучения и дальнейшего сравнение ошибки спрогнозированных временных рядов с реальными значениями. Далее происходит отсеечение наиболее больших ошибок, а отсеченные значения принимаются за аномалии. Для оценки меры качества модели, результаты её работы сравниваются с размеченными данными, предлагаемая мера качества – F1-score.

В качестве опорного метода была выбрана модель авторегрессии ARIMA [2] (AutoRegressive Integrated Moving Average) и три примитивных константных метода, которые приписывают всем событиям временного ряда либо (а) константную метку принадлежности к аномальным событиям, либо (б) принадлежности к обычным событиям, либо (в) произвольную из этих двух с вероятностью 50% каждая.

Другими классическими методами машинного обучения, использованными в настоящем исследовании, является метод с использованием библиотеки Catboost и метод на основе модели Random Forest. Кроме этого были протестированы методы с использованием искусственных нейронных сетей: LSTM и многослойный перцептрон.

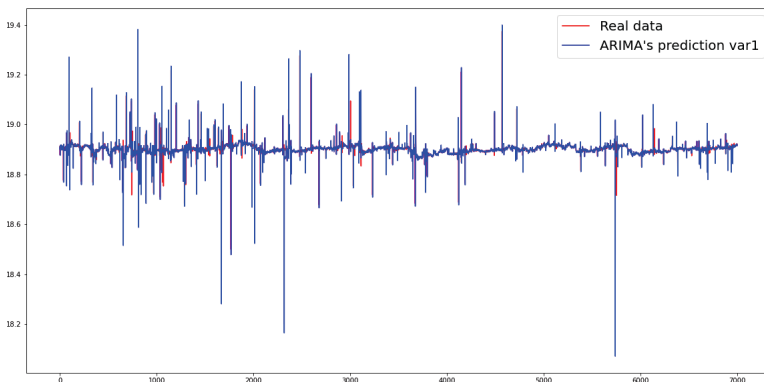


Рис. 2. Результат прогнозирования временного ряда концентрации CO₂ с применением опорного метода ARIMA. Здесь синей линией отображена концентрация CO₂, прогнозируемая модель, красной линией отображены измеренные значения.

В настоящем исследовании мы представляем результаты сравнения моделей машинного обучения в задаче идентификации аномалий в высокочастотных временных рядах. Предварительные результаты демонстрируют преимущество методов, основанных на моделях машинного обучения, перед опорным методом, основанном на ARIMA, и примитивными опорными методами. В то же время следует заметить, что прирост меры качества, полученный к настоящему моменту, не удовлетворяет требованиям с точки зрения меры качества F1 score. Для повышения качества идентификации аномалий мы планируем применить метод, основанный на прямом моделировании распределения моделируемых событий с помощью порождающих составительных нейронных сетей. Развитием настоящего исследования станет идентификация точек смены режима в анализируемых данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурба Г.Г. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство / Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А., Авилов В.К., Мамкин В.В. // ИПЭЭ им. А.Н. Северцова РАН, 2016. - 223
2. Charu C. Aggarwal Outlier Analysis / Charu C. Aggarwal // Springer New York Heidelberg Dordrecht London. – New York, 2013. - 446

УДК 551.465
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АЛГОРИТМА
УСВОЕНИЯ СПУТНИКОВЫХ И КОНТАКТНЫХ ДАННЫХ
ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ В МОДЕЛИ INMOM,
РЕАЛИЗОВАННОЙ ДЛЯ АКВАТОРИИ ОХОТСКОГО И
ЯПОНСКОГО МОРЕЙ**

Фомин В.В.^{1,2,3}, **Панасенкова И.И.**^{1,2,4}, **Дианский Н.А.**^{1,3,5}

¹ Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, 119034, Москва, Кропоткинский пер., 6, 8(499) 246-72-88, adm@oceanography.ru

² Гидрометцентр России, 123376, Россия, Москва, Большой Предтеченский переулок, д.13, строение 1, 8 (499) 252-34-48, hmc@mecom.ru

³ Институт вычислительной математики имени Г. И. Марчука РАН, 119333, Москва, ул. Губкина, 8, 8(495) 984 -81 -20, director@mail.inm.ras.ru

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01, resty@mail.ru

⁵ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, ул. Колмогорова, 1, 8 (495) 939-10-00, info@rector.msu.ru

SENSITIVITY STUDY OF THE ASSIMILATION TECHNIQUE OF
SEA SURFACE TEMPERATURE SATELLITE AND IN SITU
MEASUREMENTS IN THE INMOM MODEL FOR THE SEA OF
OKHOTSK AND SEA OF JAPAN

Fomin V.V.^{1,2,3}, Panasenkova I.I.^{1,2,4}, Diansky N.A.^{1,3,5}

¹ N. N. Zubov's State Oceanographic Institute, 6, Kropotkinsky lane, Moscow, 119034

² Hydrometcenter of Russia, 13, building 1, Bolshoy Predtechensky lane, Moscow, 123376

³ Marchuk Institute of Numerical Mathematics of RAS, 8, Gubkina Str., Moscow, 119333

⁴ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, 36, Nakhimovskii Prosp., Moscow, 117997

⁵ Moscow State University M. V. Lomonosov, 1, Kolmogorov Str., Moscow, 119991

В работе рассмотрено воспроизведение температуры поверхности Охотского моря с использованием модели морской циркуляции, реализованной для акваторий Охотского и Японского морей с усвоением данных контактных и спутниковых наблюдений по температуре воды. Для воспроизведения морской циркуляции была использована модель морской циркуляции INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), реализованная с пространственным разрешением 3.5 км. Усвоение выполнялось методом EnOI (Ensemble Optimum Interpolation). Показано, что для эффективной работы алгоритма усвоения необходимо усвоение как спутниковых, так и контактных данных наблюдений. Отмечено, что эффективность алгоритма усвоения возрастает при усвоении не только в поверхностном слое, но и по толщине верхнего перемешанного слоя.

The paper presents simulation results of the Sea of Okhotsk surface temperature using marine circulation model implemented for the Sea of Okhotsk and Sea of Japan with the assimilation of in situ and satellite measurements of water temperature. To reproduce the marine circulation, the INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) marine circulation model with a spatial resolution of 3.5 km was used. Assimilation was carried out using the EnOI (Ensemble Optimum Interpolation) method. It was shown that for the effective work of the assimilation technique, it was necessary to assimilate both satellite and instrumental observational data. It was noted that the efficiency of the assimilation technique increased with assimilation performed not only in the surface layer, but also along the upper mixed layer height.

В настоящей работе рассматривается задача воспроизведения характеристик морской циркуляции, и в частности, температуры поверхности моря с использованием модели морской циркуляции INMOM [1]. Модель INMOM была реализована для акваторий Охотского и Японского морей в повернутой относительно географической сферической системе координат. Сеточное разрешение модели составляет 0.03125° по долготе и широте, что соответствует шагу по пространству ~ 3.5 км. Область моделирования представлена в работе [1]. Усвоение данных по температуре воды выполнялось с использованием ансамблевого метода оптимальной интерполяции (EnOI) [2] с использованием программного комплекса DART. В качестве данных по усвоению использовались спутниковые данные измерений температуры поверхности моря (ТПМ), предоставляемые CMEMS (Copernicus Marine Service, продукт SST_GLO_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS_010_001), а также данные с

прибрежных наблюдательных постов, расположенных на побережье Охотского моря (всего были использованы данные с 35 наблюдательных постов).

Были проведены расчеты без усвоения данных измерений (NA), с усвоением и использованием только данных спутниковых измерений (SST), только данных наблюдений (KN02), совместным усвоением данных наблюдений и спутниковых данных (SST+KN02). Усвоение выполнялось 1 раз в 24 часа, и усваивалось только 25 % спутниковой информации. 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. Оценка эффективности алгоритма проводилась по всему набору данных измерений ТПМ со спутника в поверхностном слое. Сравнивались результаты прогноза на 24 часа после момента усвоения.

На рис. 1 показан график хода средноквадратичной ошибки результатов расчетов от спутниковых данных ТПМ. Результаты расчетов показывают, что без усвоения и с усвоением только данных станционных измерений значение средноквадратичного отклонения может достигать до 2.7°C и, в целом, изменяется в пределах $2.2 - 2.7^{\circ}\text{C}$. При усвоении в экспериментах SST и SST+KN02 средноквадратичное отклонение уменьшается значительным образом при увеличении продолжительности расчетов. Если после 1-х усвоений средноквадратичное отклонение уменьшается на 20% по отношению к эксперименту без усвоения, то к концу расчета (после 30-ти суток), значение средноквадратичного отклонения уменьшается до 1°C , что приблизительно в 2.5 раза меньше, чем значение средноквадратичного отклонения без усвоения данных наблюдений.

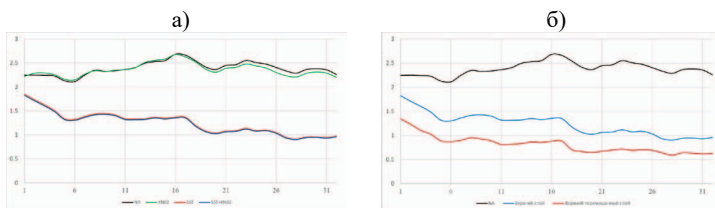


Рисунок 1 – а) Средноквадратичное отклонение [$^{\circ}\text{C}$] результатов расчетов в экспериментах без усвоения NA и экспериментах с усвоением KN02, SST и SST+KN02; б) Средноквадратичное отклонение [$^{\circ}\text{C}$] результатов расчетов в экспериментах без усвоения NA и экспериментах с усвоением ТПМ в верхнем слое и верхнем перемешанном слое.

Отдельно отметим, что в настоящей работе не ставилась цель восстановления точного начального состояния на момент начала расчета. Это позволило выполнить расчеты и, соответственно, анализ результатов с учетом ошибки, наблюдаемой в начальном состоянии и оценки эффективности работы алгоритмов усвоения, направленной на ее уменьшение.

Таким образом, усвоение спутниковой и контактной информации по температуре воды позволяет в 2 – 2.5 раза повысить точность расчета спутниковой температуры поверхности океана. Усвоение в верхнем перемешанном слое позволяет повысить точность расчетов на 0.3 – 0.5°C относительно расчетов только с усвоением ТПМ в верхнем слое модели.

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.jssc.ru/>] и на суперкомпьютере XC40-LC ФГБУ «ГВЦ Росгидромета».

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Дианский, Н.А. Ретроспективные расчеты циркуляции и ледяного покрова Охотского моря на основе современных технологий численного моделирования / Дианский Н.А., Фомин В.В., Чумаков М.М, Степанов Д.В. // 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.

НОВЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ УКБ АНТЕНН

Носов А. В., Тихонова Н.Ф.

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, a_v_nos@mail.ru*

NEW DATA PROCESSING ALGORITHM FOR UKB ANTENNAS

Nosov A.V., Tikhonova N.F.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36 Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia*

Приведено краткое описание нового алгоритма определения направления на источник звука с помощью антенны с ультракороткой базой. Обсуждены критерии применимости использования описанного алгоритма

A brief description of a new algorithm for determining the direction to a sound source using an antenna with an ultrashort base is given. The criteria for the applicability of using the described algorithm are discussed.

Положительные особенности УКБ антенн по сравнению с длинной и короткой базами хорошо известны, особенно применительно к прикладным задачам. Классическая УКБ антенна имеет линейный размер менее половины длины волны звука на используемой частоте для избежания неопределенности в определении направления, что принципиально ограничивает угловую точность системы. Типичным способом увеличения точности является совместное применение методики короткой и ультракороткой баз, когда грубая оценка направления производится путем измерения задержек между приемниками антенны, а его точная коррекция обеспечивается измерением разности фаз между ними. Такую методику нельзя отнести к области чистой УКБ. В статье [1] описывается способ преодоления противоречия между разнесением приемников и длиной волны звука, причем основанный чисто на фазовом анализе. Данная работа посвящена некоторым пояснениям и дополнениям к этой работе.

Напомним, что работа [1] основана на численном моделировании сигналов, принимаемых дискретными приемниками, расположенными на акустически жесткой плоской поверхности. Первоначально после выбора рабочей частоты производится расчет разности фаз сигналов, приходящих со всех возможных направлений, разумеется, с конечным разрешением по проекциям на подстилающую плоскость. Информация о целом количестве волн в разностях фаз отбрасывается и в дальнейшем не учитывается. После формирования принимаемого сигнала производится вычисление синусов разностей фаз между принятым сигналом и вычисленными изначально разностями для каждого из направлений. Минимум суммы модулей этих синусов соответствует искомому направлению.

Описанная методика обработки сигналов была проверена на устойчивость к воздействию шумов и показала работоспособность условно вплоть до отношения сигнал/шум 12 Дб. Следует отметить, что методика применима к антеннам, для которых возможен априорный расчет разностей фаз сигналов от гидрофонов с различных направлений. Именно поэтому в качестве модели была выбрана совокупность приемников, расположенных на жесткой плоской поверхности, поскольку для такой конструкции представляется возможным избежание влияния тыльных приходов от элементов крепления, корпуса судна и других источников искажения фаз.

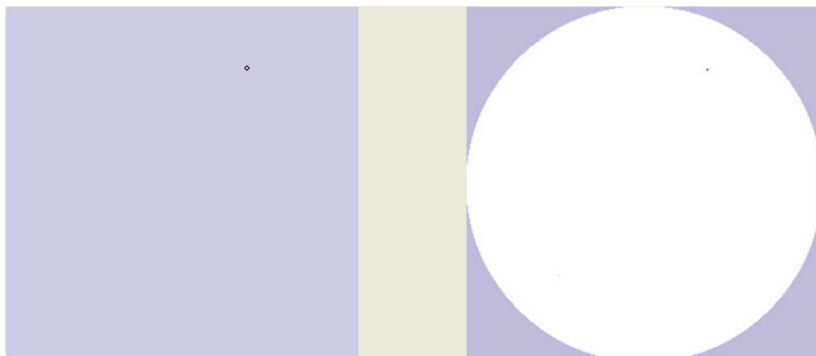


Рис.1. Пример поиска направления по описанной методике. Слева – выбранное модельное направление прихода сигнала, отображено немасштабным изображением – кольцом. Справа – результат поиска, акустическое изображение.

Применительно к реальным антеннам возникает вопрос, возможно ли заменить аналитический расчет опорных разностей фаз их физическим измерением в лабораторных условиях. Представляется, что в чистом виде

это невозможно, поскольку объем измерений может оказаться слишком большим. Так, для обеспечения углового разрешения антенны вблизи нормали $1/500$ количество учитываемых направлений составит около 1000000.

Работа выполнена в рамках государственного задания (тема № FMWE-2021-0010), проект РНФ №23-17-00156)

ЛИТЕРАТУРА

1. Носов А.В., Орлов А.Г., Мурашов А.С., Тихонова Н.Ф. Использование антенны с ультракороткой базой без определения полных фаз. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. – № 1. – С. 56-63, 10.17513/mjrfi.13346
2. Дремучев С.А., Клюев М.С., Кузнецов В.Н., Носов А.В., Парамонов А.А., Сторожев П.П. О повышении точности системы гидроакустической навигации с ультракороткой базой. Материалы конференции МСОИ 2001, Москва, 2001, с. 80-81

УДК 534.231.2

КОРРЕЛЯЦИЯ ЗВУКА, ОТРАЖЕННОГО МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Носов А.В., Тихонова Н. Ф.

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
117997, Москва, Нахимовский пр., 36, 8(499)124-13-01,*

CORRELATION OF SOUND, REFLECTED BY SEA SURFACE.

Nosov A.V., Tikhonova N. F.

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
36, Nakhimovsky Prosp., Moscow, 117997, Russia.*

Приведено описание экспериментального исследования взаимной корреляции широкополосного акустического сигнала, переизлученного взволнованной поверхностью, и исходной посылки.

An experimental study of the mutual correlation of a broadband acoustic signal over-radiated by an agitated surface and a source parcel is described.

Переизлучение звука взволнованной поверхностью воды является неотъемлемым фактором, влияющим на качество звукоподводной связи. В этой связи представляется актуальной проблема предсказания свойств отраженных акустических сигналов, в частности – корреляцией исходных широкополосных посылок с результатом отражения от поверхности. Такого рода исследования были проведены в конце прошлого века, однако их данные в силу разных причин не были опубликованы. Данная работа посвящена описанию соответствующего эксперимента и полученных в нем результатов.

Натурные измерения выполнялись с борта НИС «академик Мстислав Келдыш» во втором, шестом и одиннадцатом рейсах этого судна. Первоначально был проведен пробный эксперимент по измерению корреляции. Он показал, что она неожиданно высока не смотря на большое значение параметра Рэлея. Конфигурация последующего эксперимента была выбрана на основе предварительного теоретического анализа явления, показавшего, что приблизительная оценка коэффициента взаимной корреляции между отраженным от поверхности сигналом и исходной посылкой может быть выражена в виде

$$K = (R/T)^{1/2} \quad (1)$$

где K это средний по реализациям максимум коэффициента корреляции, R – радиус автокорреляции посылки, а T – характерная длительность поверхностной реверберации.

Технически работы производились использованием судовых лебедек, специального приемника и набора излучателей. Приемник подвешивался на кабель тросе, погружался на заданную глубину и подвешивался на поплавке (Рис 1).

В результате дрейфа судна поплавок удалялся от борта, по мере его удаления провис троса компенсировался дополнительными поплавками. После достижения заданного удаления приемника с борта погружался излучатель. Порядок погружения приемника и излучателя был выбран с расчетом уменьшения влияния судовых шумов на процесс приема и потерь в кабеле при излучении.

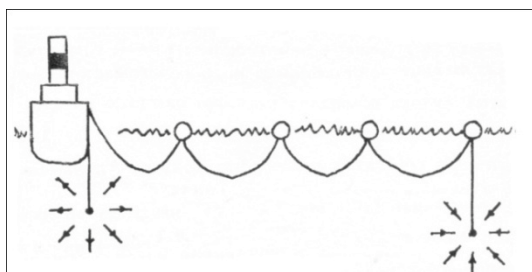


Рис.1. Технология проведения эксперимента

Массив точек приема и излучения представлен на Рис. 2. Глубины и дальности были выбраны из соображений обеспечения максимального динамического диапазона изменчивости коэффициента корреляции в рамках имевшихся технических возможностей на основании выражения (1), дополненного теоретической оценкой длительности реверберации. Ширина полосы сигналов была близка к $1/3$ октавы, центральные частоты составляли 2,4,8 и 16 кГц. Волнение моря оценивалось в 4 балла. В ходе измерений излучались два типа посылок – длинные и короткие. Длинные использовались для оценки корреляции, короткие – для оценки мощности прямого и отраженного сигналов. В том случае, когда длительность посылки не позволяла применить временное разделение прямого и отраженного сигналов, вычислялась автокорреляционная функция суммарного сигнала, а оценка коэффициента взаимной корреляции прямого и отраженного производилась с учетом их мощностей применительно к вторичному максимуму автокорреляционной функции.

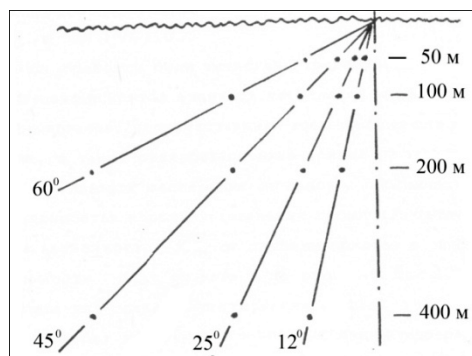


Рис. 2 Конфигурация набора положений излучателя.

Положения приемника были симметричны относительно вертикальной оси.

На Рис. 3. представлены основные результаты измерений.

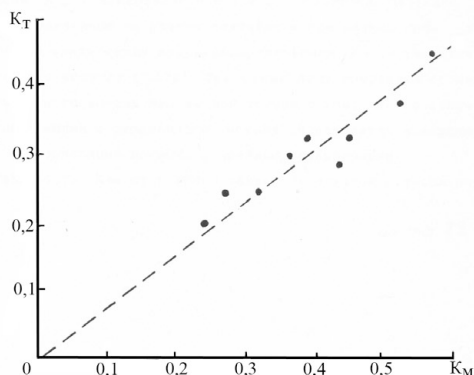


Рис. 3. Зависимость измеренного значения коэффициента взаимной корреляции посылки K_T от значения рассчитанного по формуле (1)

Соотношение между рассчитанными по формуле (1) и измеренными значениями коэффициента взаимной корреляции посылки и отраженного поверхностью сигнала получены по всему массиву измерений, для разных частот, дистанций и углов. Соотношение близко к прямо пропорциональной зависимости. Учитывая, что оценка как ширины автокорреляционной функции посылки, так и времени реверберации допускает коррекцию, предполагается возможным использование соотношения (1) для оценки уровня взаимной корреляции описанных сигналов.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема FMWE-2021-0010), экспериментальные исследования выполнены при поддержке РФФ (проект 23-17-00156)

ЛИТЕРАТУРА

1. Житковский Ю. Ю., Носов А. В., Савельев В. В. Корреляционные характеристики сигналов, отраженных взволнованной поверхностью океана в зеркальном направлении. Акуст. журн., 6, 1984, т.30, с. 772-776.
2. Носов А. В. О когерентности шумового сигнала, отраженного от взволнованной поверхности океана. В кн. Актуальные проблемы океанологии, изд. ИОАН, Москва, 1984, с. 31-35.

КОМПЛЕКСНОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОЛЕ ПРИДОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Нерсесов Б.А., Римский- Корсаков Н.А..

*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
Нахимовский пр., 36, 117997, г. Москва, nba1940 @ yandex. ru.*

INTEGRATED INFORMATION FIELD OF BOTTOM SPACE

Nersesov B. A. , Rimsky Korsakov N. A.

*Shirshov Institute of Oceanology. Russian Academy of Sciences, 36,
Nakhimovskii prospect, Moscow, 117997*

В статье обсуждается проблема информационного поля придонного пространства, синтезируемого по данным комплексов технических средств подводного наблюдения, навигации и гидрографического обеспечения

The article discusses the problem of synthesizing the information field of the near-bottom space, synthesized according to the data of the complexes of technical means of underwater observation, navigation and hydrographic support.

При проведении морских экспедиций представляет интерес анализ информационного поля придонного пространства, синтезируемого по данным комплексов технических средств подводного наблюдения, навигации и гидрографического обеспечения (табл. 1).

1. Информационное поле придонного пространства по данным средств подводного наблюдения

Комплекс технических средств подводного наблюдения (судовых и бортовых гидроакустических станций; буксируемых и бортовых магнитометрических систем; бортовых телевизионных средств)

1.1. Информационное поле придонного пространства по данным гидроакустических станций

В качестве гидроакустических станций (ГАС) для поиска объектов, находящихся на морском дне и исследования рельефа дна для прокладки и обслуживания кабелей связи и трубопроводов в основном применяются гидролокаторы бокового обзора (ГБО).

Таблица 1.

Структура комплексного информационного поля придонного пространства

Комплексное информационное поле придонного пространства		
Информационное поле подводных объектов, синтезируемое по данным технических средств подводного наблюдения		
Гидроакустических (ГАС)	Магнитометрических (ММС)	Телевизионных (ТВС)
Информационное поле объектов навигации, синтезируемое по данным судовых, бортовых и спутниковых средств обсервации		
Гидроакустических навигационных систем (ГАНС)	Автономных навигационных систем (АНС)	Спутниковых навигационных систем (СНС)
Доплеровского лага (ДЛ)	Гирокомпаса (ГК)	
Информационное поле гидрологической и геоморфологической обстановки, синтезируемое по данным судовых и стационарных средств гидрографического обеспечения		
Гидроакустических	Геофизических	Гидрофизических
Гидролокатора бокового обзора (ГБО)	Сейсмопрофилографа (СМП)	Гидрофизической станции (ГФС)
Гидроакустического профилографа (ГАП)	Магнитометрической станции (ММС)	
	Сейсмостанции (СМС)	

Как правило, в качестве средств обнаружения подводных объектов используются низкочастотные гидролокаторы. Однако, они крайне не эффективны при поиске подводных потенциально опасных объектов (ППОО) в условиях естественной маскировки (илистый грунт, донная флора, складки рельефа дна), а также на малых глубинах (до 20-30 м) из-за значительных реверберационных шумов.

Низкочастотные (70-240 кГц) гидролокаторы бокового обзора , предназначенные для исследования дна акваторий и поиска ПО способны решать задачи освещения подводной обстановки в режиме секторного и бокового обзора [1].

Однако на работу ГБО оказывают влияние маскирующие и искажающие акустические помехи, рефракции и реверберации звука,

вызываемые вертикальной пространственно-временной изменчивостью региональных океанологических процессов [2].

Отметим, что дальность действия ГБО повышается с понижением рабочей частоты, что, в свою очередь, приводит к увеличению массогабаритных характеристик.

Серьезным ограничением использования ГБО являются реверберационные помехи, вызываемые отражениями и рассеяниями исходного звука от дна, а также от неоднородностей придонной среды и наблюдаемые в условиях шельфового мелководья.

Все перечисленные выше гидрофизические факторы, влияющие на эффективность использования ГБО при проведении поисковых работ на мелководье и во внутренних водоемах, значительно ограничивают дальность их действия.

1.2. Информационное поле придонного пространства по данным магнитометрических средств поиска подводных объектов

Морские магнитометрические средства (ММС) успешно применяются при поиске подводных объектов в акваториях со сложной гидрологией и резким снижением эффективности гидроакустических станций (ГАС).

При этом дальность действия магнитометрических средств не является постоянной при обнаружении различных подводных объектов и определяется их магнитными характеристиками (величиной магнитного момента, зависящего от ферромагнитной массы ПО), расстоянием «ММС – ПО», а также чувствительностью датчика магнитного поля [3].

1.3. Информационное поле ПО, синтезируемое по данным ТВС

Отметим, что конечной целью мониторинга акватории, с предполагаемым наличием подводных потенциально опасных объектов, является не только поиск и обнаружение, но и их идентификация.

Как правило, визуальный осмотр обнаруженного ПО проводится с использованием телевизионных (черно-белых и цветных) камер телеуправляемого подводного микроаппарата (массой до 5 кг), оборудованного средствами допоиска (высокочастотным гидролокатором или бортовым ММС), а также камерой видеонаблюдения, используемой на этапе идентификации подводного объекта.

2. Информационное поле придонного пространства по данным средств судовой, бортовой и спутниковой навигации.

Автономная навигационной система (АНС) устанавливается на борту в целях обеспечения безопасности мореплавания и автоматизации обмена навигационной информацией.

Гидроакустические навигационные системы (ГАНС) направлены на использование эффекта сверхдальнего распространения низкочастотных гидроакустических сигналов в подводном звуковом канале.

Гидроакустические системы позиционирования (ГСП) предназначены для определения точных координат подводных объектов, а также для отслеживания траектории движения и текущей глубины нахождения подводных аппаратов и водолазов в реальном масштабе времени. ГСП представляют собой один или несколько стационарных передающих гидроакустических маяков, установленных на морском дне или судне-носителе, маяк-ответчик на перемещающемся или стационарном объекте, гидроакустическую антенну или гидрофон на судне-носителе и систему обработки и выдачи информации на борту судна-носителя.

Спутниковая навигационная система (СНС), в нашем случае, используется для определения местоположения надводных или подводных объектов. СНС также позволяет получить скорость и направление их движения, а также для получения точного времени. На 2020 год три спутниковые системы обеспечивают полное покрытие и бесперебойную работу для всего земного шара — ГЛОНАСС, GPS, «Бэйдоу».

3. Информационное поле придонного пространства по данным судовых и стационарных средств гидрографического обеспечения

Гидрографическое обеспечение (ГО) подразумевает такое оснащение районов движения судов и портов средствами навигационной безопасности, которое позволяет при верной настройке передачи навигационной обстановки получать судам и береговым станциям наиболее полную информацию о ситуации на воде.

Сложность создания максимально эффективного комплекса заключается в уникальности каждой отдельно взятой акватории, изменчивости условий с течением времени, факторами природного и техногенного характера, связанными с погрешностью в данных передаваемых устройствами, а также рядом других причин.

Основными типами гидрографической аппаратуры являются: гидроакустические лаги и эхолоты, многолучевые эхолоты, профилографы морского дна, гидроакустические системы позиционирования.

Гидроакустический лаг — прибор, предназначенный для измерения скорости движения носителя посредством гидролокации морского дна. Различают абсолютные гидроакустический лаг, измеряющие скорость судна относительно грунта. Разработанные в настоящее время абсолютные лаги являются гидроакустическими и делятся на доплеровские и корреляционные.

Многочувствительные эхолоты позволяют получать информацию о глубине в некоторой полосе обзора, формируя веер узких акустических лучей в поперечной плоскости судна, измерять глубину в пределах пучка узконаправленных лучей, и, следовательно, получать топографический вид морского дна, строить цифровую модель рельефа дна. Кроме того, многочувствительные системы могут использоваться для классификации донных осадков.

Профилографы дна предназначены для поиска заглубленных на дне объектов, например трубопроводов или кабелей, нахождения затонувших подводных объектов, исследования и классификации состава грунта дна, например при планировании строительства подводных объектов или прокладки трубопроводов, разведки полезных ископаемых и экологического мониторинга.

По способу размещения гидроакустической антенны различают буксируемые и стационарные профилографы. Очень часто в одном буксируемом аппарате совмещается гидролокатор бокового обзора и профилограф дна. (Работа выполнена при поддержке РФФИ - проект № 23-17-00156)

ЛИТЕРАТУРА

1. Нерсесов Б.А., Афанасьев М.С. / Комплексное использование буксируемого магнитометра и бортовых средств обнаружения и идентификации подводного аппарата. // Мат-лы XII Международной конференции «Методы и средства океанологических исследований МСОИ-2011» М.: Изд-во ИО РАН, 2011, т.2, С.87-89.
2. Казеннов А.Ю., Нерсесов Б.А., Римский – Корсаков Н.А. Экспедиционные исследования экологии морей Российской Арктики (*монография*). //ФГБНУ «Аналитический центр» Министерство образования и науки РФ, Институт океанологии РАН, М., 2018, 307с.
3. Нерсесов Б.А. Морские магнитометрические системы. //Освоение глубин Мирового океана.// Изд. дом «Оружие и технологии».- М. 2018 г. с. 370-374

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.

Аглова Е.А.	178	Дианский Н. А.	133,174,263
Александрова А.Г.	216	Дмитревский Н.Н.	231
Александрова Н.В.	216	Егоров А.В.	194
Алескерова А.А.	55	Егорова В.М.	148
Амбросимов А.К.	92,95,127,220	Елкин Д.Н.	80
Ананьев Р.А.	231	Жмур В.В.	123,174
Артемьев В.А.	88	Зацепин А.Г.	55,80,182,186
Багаев А.В.	167	Касаткин А.Я.	259
Басюк Е.О.	251	Кенигсбергер Г.В.	107
Белевитнев Я.И.	178	Кловиткин А.А.	88
Белов Д.В.	107	Клюев М. С.	206
Белоненко Т.В.	123	Ковалев Г.А.	95
Бондаренко А.Л.	33	Коваль Г.Я.	151
Борисов Д.Г.	255	Ковачев С.А.	194,198,208
Бреховских А. Л.	206	Козырева А.Ю.	151
Будянский М.В.	84	Колигаев С.О.	115
Буканова Т.В.	161	Коротенко К.А.	163
Буланов А.В.	68,72	Кошкина В.С.	138
Булатов В. В.	20,25,60	Криницкий М.А.	131, 255,259
Бышев В.И.	43	Круглинский И.А.	119
Венцкут Ю.И.	178	Крылов А.А.	194
Витинг К.Б.	92	Кубряков А.А.	55,76
Владимиров И. Ю.	20	Куприянова А.Е.	99
Володин В.Д.	178	Кучейко А.А.	151
Вязилов Е. Д.	243	Левченко Д.Г.	202
Вязилова Н.А.	247	Лепешко В. В.	190
Гавриков А.	138	Ли Н. С.	190
Гаврилов А.В.	224, 228	Либина Н.В.2	198,208
Герасимов В.В.	186	Лишаев П.Н.	55
Глитко О.В.	88	Лобчук О.И.	161
Глухов В.А.	88	Малахова В.В.	228
Глуховец Д.И.	119,178	Медведев Е.В.	212
Голиков В.А.	255	Медведева А.В.	55,60,64
Гольдин Ю.А.	178	Мельников Д. А.	243
Гриценко В.А.	99	Мельников В.А.	127,163
Гулен С.К.	259	Мельниченко Ю.И.	190
Гусев А.В.	43,174	Мизюк А.И.	55
Демешкин А.С.	216	Михеев А. С.	243
Демешко Д.М.	92	Мороз Е.А.	231
Дерягин Д.Н.	119	Мутовкин А.Д.	198,238

Мысленков С.А.	151	Серых И.В.	16
Нерсесов Б.А.	273	Сидорова А.Н.	43
Нешенко И.П.	107	Соловьев В.А.	103
Новиков Б.А.	76	Соседко Е.В.	68
Новоселова Е.В.	123	Ставров К.Г.	170
Носов А.В.	267,269	Станичный С.В.	55,60,64
Орехова Н.А.	212	Степанов В.В.	170
Осадчиев А.А.	131	Тарасов Л.Л.	107
Островский А.Г.	182	Тихонова Н.Ф.	267,269
Павлова Е.А.	170	Толстиков А.В.	16
Павлова М.А.	88,119	Трофимов А.Г.	29
Панасенкова И. И.	133, 263	Трусенкова О.О.	39
Перескоков А.И.	10	Удовик В.Ф.	167
Пижанкова Е.И.	224,228	Улейский М.Ю.	84
Плотников Е.В.	55	Устинова Е.И.	251
Подымов И.С.	56	Федотов Г.А.	144
Подымов О.И.	182	Филатов В.Н.	251
Подымова Т.М.	56	Фомин В. В.	133, 263
Пономарев А. Н.	25	Химченко Е.Е.	107
Попов О.Е.	107	Хортов А.В.	238
Попова А.А.	228	Чепыженко А.И.	55
Пранц С.В.	84	Черных Д.В.	231
Пронин А.А.	238	Чубаренко И.П.	161
Пронина Ю.О.	95	Шатохин М.В.	157
Пузина О.С.	55	Шварцман Д.Р.	80
Ревунова А.В.	235	Швед В.А.	92
Римский- Корсаков Н.А.	238,273	Шрейдер А. А.	206
Росляков А.Г.	231	Шутов С.А.	167
Савин А.С.	131	Щевьев В. А.	46,50
Сажнева А. Э.	206	Щербаченко С.В.	167
Сентябов Е.В.	12	Holloway Р.Е.	111
Серебряный А.Н.	107,111		

Научное издание
Сборник

ISBN 978-5-6045110-9-1

DOI 10.29006/978-5-6045110-9-1-2023

«Современные методы и средства океанологических исследований»
(МСОИ-2023)

Материалы XVIII Международной научно-технической конференции

Том II

Москва, Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, 2023. – 280 с.

Тираж 50 экз.

ISBN 978-5-6045110-9-1