



**XII Международная научно-практическая конференция
«Морские исследования и образование»
MARESEDU-2023**

**XII International conference
«Marine Research and Education»
MARESEDU-2023**

**ТРУДЫ КОНФЕРЕНЦИИ /
CONFERENCE PROCEEDINGS
Том IV (IV) / Volume IV (IV)**

**23-27 октября 2023 г.
г. Москва**



УДК [551.46+574.5](063)

ББК 26.221я431+26.38я431+28.082.40я431

T78

Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» Том IV (IV): [сборник]. Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2024, 505 с.:

ISBN 978-5-6049290-6-3

ISBN 978-5-6051693-1-4 (т.4)

Сборник «Труды XII Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2023)» представляет собой книгу тезисов докладов участников конференции, состоящую из четырех томов. Сборник включает в себя главы, соответствующие основным секциям технической программы конференции: океанология, гидрология, морская геология, гидрографические и геофизические исследования на акваториях, морские ландшафты морская биология, морские млекопитающие, рациональное природопользование и подводное культурное наследие. Помимо основных секций на конференции были представлены: пленарная сессия, посвященная 70-летию кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и 85-летию ББС МГУ имени Н.А. Перцова, секция научно-популярных фильмов и круглые столы: «Современные авиационные исследования объектов биологического разнообразия. Практика и перспективы развития» и «Применение искусственного интеллекта для изучения биологических объектов».

Все тезисы представлены в редакции авторов.

В рамках конференции участники обсудили состояние и перспективы развития комплексных исследований Мирового океана, шельфовых морей и крупнейших озер, актуальные проблемы рационального природопользования и сохранения биоразнообразия в водных пространствах, проблемы освоения ресурсов континентального шельфа, достижения науки в области морской геологии, современные подходы к исследованиям обширных акваторий дистанционными методами, проблемы устойчивого развития экосистем моря и прибрежной зоны, организацию и проведение комплексных экспедиционных исследований, преподавание «морских дисциплин», вопросы организации полевых практик студентов.

Подготовлено к выпуску издательством ООО «ПолиПРЕСС» по заказу ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова».

ООО «ПолиПРЕСС»

170041, Россия, г. Тверь, Комсомольский
пр-т, д. 7, пом. II polypress@yandex.ru

Все права на издание принадлежат
ООО «Центр морских исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова».

© ООО «Центр морских исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова», 2024
© ООО «ПолиПРЕСС»

ОРГАНИЗАТОРЫ

Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова



Учебно-научный Центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова



Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН



Беломорская биологическая станция им. Н.А. Перцова



Биологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова



Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова



Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова



РОО «Совет по морским млекопитающим»



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В РАМКАХ



2021-2030 Десятилетие Организации Объединенных Наций, посвященное науке об океане в интересах устойчивого развития



70 ЛЕТ



МГУ
85

ПАРТНЁРЫ

Генеральный партнёр

Специальный партнёр

Официальный партнёр



ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

ДОБРЮЛОВ СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ
(сопредседатель организационного комитета)

Член-корреспондент РАН, декан географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.г.н., профессор

ЕРЁМИН НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ
(сопредседатель организационного комитета)

Член-корреспондент РАН, декан геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова, д.х.н.

КИРПИЧНИКОВ МИХАИЛ ПЕТРОВИЧ
(сопредседатель организационного комитета)

Академик РАН, декан биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.б.н., профессор

ТОКАРЕВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ
(сопредседатель организационного комитета)

Заместитель председателя Общественного совета РОСНЕДРА, к.т.н.

ШЕВЧЕНКО ВЛАДИМИР ПЕТРОВИЧ
(сопредседатель организационного комитета)

Временно исполняющий обязанности директора Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, руководитель лаборатории физико-геологических исследований имени А.П. Лисицына, ведущий научный сотрудник, к.г.-м.н.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

АХМАНОВ ГРИГОРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ
(председатель программногo комитета)

Доцент, руководитель кафедры ЮНЕСКО по морской геологии и геофизике, директор Учебно-научного Центра ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова, к.г.-м.н.

БАШИРОВА ЛЕЙЛА ДЖАНГИРОВНА

Заместитель директора по научной работе Атлантического отделения ИО РАН, к.г.-м.н.

ВИННИКОВ КИРИЛЛ АНДРЕЕВИЧ

Директор Института Мирового океана ДВФУ, Заведующий Лабораторией экологии и эволюционной биологии водных организмов, доцент Департамента медицинской биологии и биотехнологий, PhD

ГЛАЗОВ ДМИТРИЙ МИХАЙЛОВИЧ

Исполнительный директор РОО «Совет по морским млекопитающим»

ДЕМИДЕНКО НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Старший научный сотрудник ИО РАН, к.г.н

ДЕМИДОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

Доцент, старший научный сотрудник кафедры океанологии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, к.г.н.

ДОРОХОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Старший научный сотрудник лаборатории геологии Атлантики Атлантического отделения ИО РАН, к.г.н.

ЛОБКОВСКИЙ ЛЕОПОЛЬД ИСАЕВИЧ

Академик РАН, Научный руководитель геологического направления Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), д.ф.-м.н.

КОНОВАЛОВА ОЛЬГА ПЕТРОВНА

Руководитель Управления научных исследований и разработок Центра морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова (ЦМИ МГУ), к.б.н.

КРАШЕНИННИКОВА СВЕТЛАНА БОРИСОВНА

Старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН», к.г.н.

МОКИЕВСКИЙ ВАДИМ ОЛЕГОВИЧ

Заведующий лабораторией экологии прибрежных донных сообществ ИО РАН, д.б.н.

НАЙДЕНКО СЕРГЕЙ ВАЛЕРИЕВИЧ

Директор Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (ИПЭЭ РАН), член-корреспондент РАН, д.б.н., профессор

НОВИГАТСКИЙ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

Заведующий Аналитической лаборатории ИО РАН, к.г.-м.н.

ПОТЁМКА АНДРЕЙ КОНСТАНТИНОВИЧ

Аспирант кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

РЫБАЛКО АЛЕКСАНДР ЕВМЕНЬЕВИЧ

Профессор кафедры геоморфологии СПбГУ, ведущий научный сотрудник ФГБУ «ВНИИОкеангеология», старший геолог ООО «Морской центр», д.г.-м.н.

СЕМЁНОВА МАРИНА ИВАНОВНА

Директор по цифровым технологиям ООО «Моринтех»

СИВКОВ ВАДИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ

Директор Атлантического отделения ИО РАН, к.г.-м.н.

СОЛОВЬЁВА МАРИЯ АНДРЕЕВНА

Научный сотрудник лаборатории поведения и поведенческой экологии млекопитающих ИПЭЭ РАН, к.б.н.

СУБЕТТО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

Декан Факультета географии РГПУ имени А.И. Герцена, заведующий кафедрой физической географии и природопользования РГПУ им. А.И. Герцена, д.г.н.

ТЕРЁХИНА ЯНА ЕВГЕНЬЕВНА

Научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова

ЦЕТЛИН АЛЕКСАНДР БОРИСОВИЧ

Директор Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова, профессор биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, д.б.н.

ФАЗЛУЛЛИН СЕРГЕЙ МАРАТОВИЧ

Президент Конфедерации подводной деятельности России, доцент кафедры музеологии РГГУ, Член-корреспондент РАЕН, к.г.н.

ШАБАЛИН НИКОЛАЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ
(председатель координационного комитета)

Исполнительный директор ЦМИ МГУ



КООРДИНАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

НЕСМЕЯНОВА ЕКАТЕРИНА МИХАЙЛОВНА

Начальник отдела образовательных проектов и связей с общественностью ЦМИ МГУ

КОВАЛЁВА АНАСТАСИЯ МИХАЙЛОВНА

Старший специалист отдела образовательных проектов и связей с общественностью ЦМИ МГУ

БИЛЯЛОВА АНАСТАСИЯ АНДРЕЕВНА

Специалист отдела образовательных проектов и связей с общественностью ЦМИ МГУ

ФРИХ-ХАР АННА ЮРЬЕВНА

Специалист отдела образовательных проектов и связей с общественностью ЦМИ МГУ



КООРДИНАТОР

Центр морских исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова

Контактная информация:
119234, Россия, г. Москва,
ул. Ленинские горы, 1-77
Научный парк МГУ, офис 402
t.: +7 (495) 648 65 88
e.: info@marine-rc.ru
w.: www.marine-rc.ru



**ЦМИ
МГУ**



@CMI_MSU



КОНТАКТЫ

По вопросам участия в конференции:
e.: maresedu@marine-rc.info
t.: +7 (495) 648 65 88

Том IV (IV) / Volume IV (IV)

Оглавление / Contents

Программа конференции / Conference Programme

Тезисы / Abstracts

Морская геология. Устные доклады

ПОТОК ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ДНО В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ: СОПОСТАВЛЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ РАСЧЕТНЫХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ЛОВУШЕК <u>Новигатский А.Н.</u> , Кловиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Филиппов А.С., Шевченко В.П.	17
ГАЗОГИДРАТНЫЕ ПРОВИНЦИИ НА ШЕЛЬФЕ И СКЛОНЕ ОСТРОВА САХАЛИН <u>Сырбу Н.С.</u> , Холмогоров А.О.	23
ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕАКЦИИ ПОДДОННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА МГНОВЕННОЕ ВЫПАХИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ АЙСБЕРГА В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ <u>Суетнова Е.И.</u>	29
ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ В ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ <u>Сигачева Л.Ю.</u> , Видищева О.Н., Полудеткина Е.Н., Калмыков А.Г., Ахманов Г.Г.	31
ПЕРСПЕКТИВЫ ГАЗОГИДРАТНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Матвеева Т.В.</u> , Щур А.А., Чазов А.О.	35
ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ЛЕДНИКОВЫХ И ВНЕЛЕДНИКОВЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИНАХ АРКТИКИ <u>Друщиц В.А.</u>	39
ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ <u>Сухих Е.А.</u> , Ананьев Р.А., Мороз Е.А.	47
РАЗЛОМЫ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И СВИДЕТЕЛЬСТВА ИХ СОВРЕМЕННОЙ АКТИВНОСТИ <u>Рукавишников Д.Д.</u> , Баранов Б.В., Дозорова К.А., Цуканов Н.В., Крылов А.А.	55
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НА ПЛОЩАДИ ВБЛИЗИ О-ВА УЕДИНЕНИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ) <u>Буланова И.А.</u> , Терёхина Я.Е., Понимаскин А.И., Колобакин А.А.	60
ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИЧАСТОТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПОДНЯТИЯ ДЕ-ЛОНГА, ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ) <u>Хлебникова О.А.</u> , Замотина З.С., Понимаскин А.И., Терёхина Я.Е., Токарев М.Ю., Махова О.С., Колобакин А.А.	66
ЭВОЛЮЦИЯ УСЛОВИЙ СЕДИМЕНТАЦИИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ <u>Рябчук Д.В.</u> , Талденкова Е.Е., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М., Жамойда В.А., Неевин И.А., Прищепенко Д.В., Носевич Е.С., Пушина З.В., Григорьев А.Г., Токарев М.Ю., Баширова Л.Д., Пономаренко Е.П.	72
ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-КАРСКОГО ШЕЛЬФА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ С БЛИЗЛЕЖАЩИМИ РЕГИОНАМИ <u>Рыбалко А.Е.</u> , Токарев М.Ю., Полудеткина Е.Н., Пирогова А.С., Потемка А.К., Аксенов А.О., Кудинов А.А., Бирюк М.А., Терехина Я.Е., Замотина З.С.	78
ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПИНГОПОДОБНЫХ ФОРМ МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ <u>Кохан А.В.</u> , Мороз Е.А., Денисова А.П., Сухих Е.А., Еременко Е.А.	82
ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДВОДНОГО РУСЛА ПРА-ПЕЧОРЫ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СТАНДАРТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 3D <u>Соловьёва М.А.</u> , Терёхина Я.Е., Хлебникова О.А., Горбачев С.В., Нурмухамедов Т.В.	87
ОСОБЕННОСТИ ГЕОМОРФОЛОГИИ ДНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТИРОВАНИЯ И НЕПРЕРЫВНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ <u>Сергеев А.Ю.</u> , Буданов Л.М., Жамойда В.А., Ковалева О.А., Рябчук Д.В., Дорохов Д.В.	91
ПРАКТИКА И ТРЕБОВАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ НА ШЕЛЬФЕ <u>Локтев А.С.</u> , Рыбалко А.Е.	99

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА <u>Рыбалко А.Е.</u> , Токарев М.Ю., Кудинов А.А., Бирюк М.А., Корост С.Р., Репкина Т.Ю., Терехина Я.Е., Беляев П.Ю., Потемка А.К., Алешин М.И., Дронь О.В.	104
НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПЕРЕХОДЕ ОТ ПОЗДНЕГО НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА К ГОЛОЦЕНУ НА КАНДАЛАКШСКОМ И ТЕРСКОМ БЕРЕГАХ БЕЛОГО МОРЯ <u>Зарецкая Н.Е.</u> , Баранов Д.В., Писцова М.А., Хайтов В.М., Рыбалко А.Е.	110
РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРО- И НАЛЕДНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ <u>Лыгин И.В.</u> , Ивашкина О.О., Кузнецов К.М., Токарев М.Ю.	115
ТЕЧЕНИЯ В ЧЕРНОЙ ГУБЕ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА <u>Иванова И.Н.</u> , Будников А.А., Левонян К.А., Сергеев А.С.	121
РИТМЫ ПРИБРЕЖНЫХ ЭОЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ <u>Репкина Т.Ю.</u> , Леонтьев П.А., Кублицкий Ю.А., Орлов А.В., Вахрамеева Е.А., Лосюк Г.Н., Якимова К.С., Комагорова М.А., Крехов А.К., Гуринов А.Л., Вяткин Е.Д., Луговой Н.Н., Шилова О.С.	126
НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ГИДРАТОНОСНОЙ СТРУКТУРЫ «МГУ» (ОЗЕРО БАЙКАЛ) <u>Немченко Н.В.</u> , Соловьёва М.А., Видищева О.Н., Уголькова Е.А., Кудавев А.А., Исаходжаев Ф.Б., Голощапов Г.А., Ахманов Г.Г.	134
ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕ- ГАЗОГЕНЕРАЦИИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ <u>Рязанцева К.Ю.</u> , Большакова М.А., Ахманов Г.Г., Видищева О.Н., Деленгов М.Т.	138
ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАЙКАЛ <u>Видищева О.Н.</u> , Богданов А.А., Рязанцева К.Ю., Ахманов Г.Г., Абля Э.А., Калмыков А.Г.	144
РОЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ <u>Соловьёва М.А.</u> , Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Мащини А., Хлыстов О.М.	148
МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ В ЭКСПЕДИЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-41» <u>Попова Е.А.</u> , Богин В.А., Малышев С.А., Ованесян Г.И.	153
СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРЫМСКО-КАВКАЗСКОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ - ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ <u>Хортов А.В.</u> , Есин Н.И., Пронин А.А.	158
ПРОЯВЛЕНИЯ ОСАДОЧНОГО КРИПА НА СКЛОНАХ КОТЛОВИНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ <u>Миронюк С.Г.</u> , Росляков А.Г.	164
ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЛИТОДИНАМИКА ПОБЕРЕЖЬЯ О. ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) <u>Хомчановский А.Л.</u> , Батанов Ф.И.	171
ПОДВОДНЫЕ ВУЛКАНЫ ВБЛИЗИ ОСТРОВА СИМУШИР (КУРИЛЬСКАЯ ОСТРОВНАЯ ДУГА) <u>Рашидов В.А.</u> , Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгалы А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Трусов А.А.	177
ОСАДОЧНОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ ТРАНСФОРМНОЙ ЗОНЫ ЧАРЛИ-ГИББС <u>Дорохова Е.В.</u> , Пономаренко Е.П., Пугачева Т.Л., Баширова Л.Д., Соколов С.Ю.	183
РАЗНООБРАЗИЕ СТРОЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОСТРОЕК В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИКИ <u>Мазарович А.О.</u>	192
КАРТИРОВАНИЕ ДАЙКОВОГО КОМПЛЕКСА БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ <u>Лыгин И.В.</u> , Кузнецов К.М., Арутюнян Д.А., Соколова Т.Б.	195
ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ МЕГАВАЛА НАЛИВКИНА, КАРСКОЕ МОРЕ <u>Кишанков А.В.</u> , Полудеткина Е.Н., Басова Е.Д., Кирсанова А.А., Токарев М.Ю.	201
МИНЕРАЛОГИЯ И СОСТАВ МИКРОФОССИЛИЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДОЛИНЫ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ВИМА, КАК ДОКАЗАТЕЛЬСТВО ЛАТЕРАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА <u>Борисов Д.Г.</u> , Мурдмаа И.О., Дара О.М., Лыкова М.А., Иванова Е.В.	204
РАЗВИТИЕ ПОДВИЖЕК КУПОЛОВ ДРЕВНЕГО БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА <u>Кашдан А.И.</u> , Шейнкман В.С.	207
СОВРЕМЕННАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ КРИОЛИТОЗОНЫ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ <u>Гаврилов А.В.</u> , Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А.	212
МОРФОЛИТОГЕНЕЗ И ОБРАЗОВАНИЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ (ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ) <u>Гаврилов А.В.</u> , Пижанкова Е.И.	219
ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ КОРАЛЛОВОЕ И МОЛОДЁЖНОЕ (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ) <u>Мусатов А.Е.</u> , Козлов С.А., Маковиз А.М.	224
ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ В ЗОНЕ КЛАРИОН-КЛИШПЕРТОН ТИХОГО ОКЕАНА В ПРЕДДВЕРИИ ИХ ПРОМЫШЛЕННОЙ РАЗРАБОТКИ <u>Захаров М.С.</u> , Кондратенко А.В.	231
МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИКАВКАЗСКИХ ПОДВОДНЫХ КАНЬОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ <u>Глазырин Е.А.</u>	237

Морская геология. Стеновые доклады

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В СРЕДНЕМ-ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ НА ОСНОВЕ ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ <u>Ласкина Д.Н., Дорохова Е.В.</u>	242
МОРФОДИНАМИКА БЕРЕГОВ ОСТРОВА КУНАШИР (ЮЖНЫЕ КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА) <u>Кузнецов М.А.</u>	248
РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ВОСТОЧНОЙ И ЮЖНОЙ ЧАСТЯХ КУРШСКОГО ЗАЛИВА В ГОЛОЦЕНЕ <u>Чернова И.Г., Моданова Е.В., Румянцева Н.А., Ладыгина А.А., Пономаренко Е.П., Кулешова Л.А.</u>	253
ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (КТ) ПРИ ИЗУЧЕНИИ МОРСКИХ ОСАДКОВ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ) <u>Косоватова Т.А., Корост С.Р.</u>	261
ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ВО ВЗВЕСИ ПРИУСТЬЕВОЙ ЗОНЫ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ: СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ <u>Коченкова А.И., Стародымова Д.П., Лохов А.С.</u>	268
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ ЗАПАДНОГО ЯМАЛА <u>Кажукало Г.А., Новикова А.В., Мысленков С.А., Шабанова Н.Н., Белова Н.Г., Огородов С.А.</u>	273
КОРРЕЛЯЦИЯ СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ <u>Чекулаев А.В., Рябчук Д.В., Буданов Л.М.</u>	278
ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЕВРАЗИЙСКОЙ ОКРАИНЫ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ДЛЯ РАСЧЕТА УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ <u>Смирнов Ю.Ю., Бочкарев А.В., Матвеева Т.В.</u>	286
СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ <u>Крылов А.А., Новиков М.А., Рукавишников Д.Д.</u>	290
ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОБСКОЙ ГУБЫ КАРСКОГО МОРЯ <u>Ермолов А.А., Кажукало Г.А., Огородов С.А.</u>	293
СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЗИМНИЙ СЕЗОН НА МЫСЕ ЧЕЛЮСКИНА ПО ДАННЫМ БОЛЬШОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ 2022-2023 ГОДЫ <u>Еремеев А.Д., Родикова В.Г., Новигатский А.Н., Ткачева Е.С., Саввичев А.С., Шевченко В.П.</u>	295
УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ НА ЭРОЗИОННОМ ПЛЯЖЕ (ПОБЕРЕЖЬЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ) <u>Казаков А., Данченков А.Р.</u>	301
ОСАДОЧНЫЕ ВОЛНЫ НА ПЛАТО САНТА-КАТАРИНА: МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ <u>Попов М.С., Борисов Д.Г.</u>	304
РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ <u>Александрова А.Г., Семенов П.Б., Александрова Д.В.</u>	312
ЭВОЛЮЦИЯ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ЭНДРЮ-БЕЙН (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ) <u>Боголюбский В.А., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л.</u>	316
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА <u>Малицкий С.И., Ялук А.В., Бовсун М.А., Швалов Д.А., Корнеева А.О., Новиков О.С., Медведева А.А.</u>	321
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В АКВАТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА <u>Новиков О.С., Ялук А.В., Швалов Д.А., Бовсун М.А., Корнеева А.О., Медведева А.А., Малицкий С.И.</u>	326

Морские ландшафты. Устные доклады

ЛАНДШАФТНО-БИОНОМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ СЕЗОННОЙ И МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ CHL-A ФИТОПЛАНКТОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ <u>Ракигин Т.Д.</u>	334
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ЛАНДШАФТОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2023 Г. <u>Дорохов Д.В., Дорохова Е.В., Дудков И.Ю.</u>	342
НОВЫЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДНОГО БЕРЕГОВОГО СКЛОНА САМБИЙСКОГО П-ОВА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭХОЛОТНОЙ СЪЕМКИ В 2021-2022 ГГ. <u>Дудков И.Ю., Дорохов Д.В., Кондрашов А.А.</u>	347
КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЛЬМЕНСКО-ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ ПРИУСТЬЕВОЙ МЕСТНОСТИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ <u>Токарев М.Ю., Фрих-Хар А.Ю., Корост С.Р., Полудеткина Е.Н., Рыбалко А.Е., Терехина Я.Е.</u>	353
МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ БУХТЫ ЛАСПИ (Г. СЕВАСТОПОЛЬ) <u>Панкеева Т.В., Миронова Н.В.</u>	359

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ МОРСКОГО ГАЗОВОГО ТЕРМИНАЛА КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ <u>Меркурьева В.М., Дорохов Д.В., Дорохова Е.В., Наумов И.А.</u>	363
НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ДЮН НА ПОДВОДНОМ БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ КУРШСКОЙ КОСЫ <u>Орлов Е.К., Дорохов Д.В.</u>	367
ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОТЛОВИН ВЫДУВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ БАЛТИЙСКОЙ КОСЫ <u>Задоя Л.С.</u>	370
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕРЕГОВЫХ ТЕРРАС ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА <u>Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б.</u>	372
ФЕСТОННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА ЛАГУННОГО БЕРЕГА КУРШСКОЙ КОСЫ <u>Михневич Г.С., Ефимова К.А.</u>	375

Морские ландшафты. Стендовые доклады

ФОРМИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА О. АНЗЕР (СОЛОВЕЦКИЙ АРХИПЕЛАГ, БЕЛОЕ МОРЕ) В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ <u>Левкова Д.Н., Сапелко Т.В., Кузнецов Д.Д., Леонтьев П.А., Субетто Д.А.</u>	381
--	-----

Гидрографические и геофизические исследования на акваториях. Устные доклады

ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АКВАТОРИЯХ <u>Ильинский Д.А., Коган Л.И., Рогинский К.А., Хортов А.В.</u>	390
КАК ПОСТРОИТЬ СОВРЕМЕННУЮ ПЛАТФОРМУ УПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКИМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ ЗОНДОМ-ПРОФИЛОГРАФОМ? <u>Кочетов О.Ю., Волков С.В., Островский А.Г.</u>	398
АПРОБАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В АРКТИКЕ <u>Преснов Д.А., Вакарчук Р.Н., Жостков Р.А., Овсяченко А.Н., Прокопович И.В., Тимофеева А.Б., Шуруп А.С.</u>	404
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ <u>Михайлов П.С., Конешнов В.Н.</u>	411
РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРЕДЕЛЬНОМ МЕЛКОВОДЬЕ В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ <u>Белов М.В., Потемка А.К., Токарев М.Ю.</u>	416
ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЕНТОСНЫХ ОРГАНИЗМОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ <u>Бибиков Н.Г., Попов О.Е., Корецкий М.И., Кенигсбергер Г.В., Михеев В.И.</u>	419
АТРИБУТИВНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ МОВ ОГТ 2D ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГИДРАТО- И ГАЗООБУСЛОВЛЕННЫХ АНОМАЛИЙ НА ШЕЛЬФЕ И КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ <u>Чазов А.О., Матвеева Т.В.</u>	424
ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ АНОМАЛИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО РЕГИОНА <u>Шклярук А.Д., Кузнецов К.М., Лыгин И.В., Арутюнян Д.А.</u>	431
ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА 3D СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА МЕЛКОВОДНЫХ УЧАСТКАХ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА <u>Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Понимаскин А.И., Соловьева М.А., Хлебникова О.А., Горбачев С.В.</u>	438
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВЫХ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В БУХТЕ ЛАСПИ (КРЫМ) <u>Будников А.А., Иванова И.Н., Хурчак А.И., Малахова Т.В.</u>	441
К ВОПРОСУ О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ <u>Токарев М.Ю., Токарев А.М., Понимаскин А.И., Яковенко А.Д.</u>	448
РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ОСАДКОВ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ <u>Дернова А.С., Пирогова А.С., Ошкин А.Н.</u>	456
РЕЗУЛЬТАТЫ МУЛЬТИЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРО-КАРСКОЙ АКВАТОРИИ <u>Трубко С.С., Терехина Я.Е.</u>	464
МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МУЛЬТИЧАСТОТНЫХ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НИЛЬМИНСКО-ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ ПРИУСТЬЕВОЙ МЕСТНОСТИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ <u>Дедова Т.А., Белов М.В.</u>	469

АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСКОМ МОРЕ НА ТЕРРАСЕ ГЕРКУЛЕСА ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ <u>Бабушкина К.В.</u> , Старовойтов А.В.	475
ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ <u>Яковенко А.Д.</u> , Токарев М.Ю.	482
Приложение	487
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА I (IV)	488
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА II (IV)	495
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА III (IV).....	500

Программа

Programme

**Место проведения: Институт океанологии им. П. П. Ширшова
РАН, г. Москва, Нахимовский проспект, 36**

23 октября, понедельник

	Большой зал	Малый зал	Аудитория	Online
08.00–13.30	Регистрация			
09.00–10.40	Океанология	Морская биология	Гидрографические и геофизические исследования на акваториях	
10.40–10.55	Перерыв			
10.55–12.35	Океанология	Морская биология	Гидрографические и геофизические исследования на акваториях	
12.35–13.30	Обеденный перерыв			
13.30–15.10	Океанология	Морская биология	Гидрографические и геофизические исследования на акваториях	
15.10–15.25	Перерыв			
15.25–17.05	Океанология	Морская биология	Гидрографические и геофизические исследования на акваториях	
17.05–17.20	Перерыв			
17.20–19.00	Пленарная сессия, посвященная 70-летию кафедры океанологии географического факультета МГУ и 85-летию БС МГУ			
19.00–20.00	Приветственный фуршет			

24 октября, вторник

	Большой зал	Малый зал	Аудитория	Online
08.30–13.30	Регистрация			
09.00–10.40	Научно-популярные фильмы	Морская биология	Подводное наследие и водолазные методы	Морская геология (Online)
10.40–10.55	Перерыв			
10.55–12.35	Научно-популярные фильмы	Морская биология	Подводное наследие и водолазные методы	Морская геология (Online)
12.35–13.30	Обеденный перерыв			
13.30–15.10	Океанология	Морская биология	Подводное наследие и водолазные методы	
15.10–15.25	Перерыв			
15.25–17.05	Океанология	Морская биология	Подводное наследие и водолазные методы	
17.05–18.35	Стендовая сессия Океанология (очные стенды)	Стендовая сессия Морская биология (очные стенды)	Стендовая сессия Подводное наследие и водолазные методы	

25 октября, среда

	Большой зал	Малый зал	Аудитория	Online
08.30–13.30	Регистрация			
09.00–10.40	Морская геология	Морская биология	Рациональное природопользование	Океанология (Online)
10.40–10.55	Перерыв			
10.55–12.35	Морская геология	Морская биология	Рациональное природопользование	Океанология (Online)
12.35–13.30	Обеденный перерыв			
13.30–15.10	Морская геология	Стендовые сессия Морская биология (очные стенды)	Рациональное природопользование	Океанология (Online)
15.10–15.25	Перерыв			
15.25–17.05	Морская геология	Круглый стол: «Современные авиационные исследования объектов биологического разнообразия. Практика и перспективы развития»	Рациональное природопользование	Стендовая сессия Океанология (Online)
17.05–18.35	Стендовая сессии: Морская геология (очные стенды)		Стендовая сессия Рациональное природопользование (очные стенды)	
18.35–19.00				

26 октября, четверг

	Большой зал	Малый зал	Аудитория	Online
08.30–13.30	Регистрация	Регистрация	Регистрация	
09.00–10.40	Морская геология	Морские млекопитающие	Гидрология суши	Морская биология (Online)
10.40–10.55	Перерыв			
10.55–12.35	Морская геология	Морские млекопитающие	Гидрология суши	Морская биология (Online)
12.35–13.30	Обеденный перерыв			
13.30–15.10	Морские ландшафты	Морские млекопитающие	Гидрология суши	Морская биология (Online)
15.10–15.25	Перерыв			
15.25–17.05	Морские ландшафты	Морские млекопитающие	Гидрология суши	
17.05–18.35	Стендовые сессии: Морская геология и Морские ландшафты	Стендовая сессия Морские млекопитающие (очные стенды)	Стендовая сессия Гидрология суши	

27 октября, пятница

	Большой зал	Малый зал	Аудитория	Room 1
08.30–11.30	Регистрация			
09.00–10.40	Морская геология	Морские млекопитающие	Гидрология суши	Рациональное природопользование (Online)
10.40–10.55	Перерыв			
10.55–12.35	Морская геология	Морские млекопитающие	Гидрология суши	Рациональное природопользование (Online), Стендовая сессия (Online)
12.35–13.30		Стендовая сессия Морские млекопитающие (Online)	Стендовая сессия Гидрология суши (Online)	

**Место проведения: кластер «Ломоносов», научная долина МГУ,
Раменский бульвар, 1**

24 октября, вторник

Зал «Кинетика»	
10.00-13.00	Круглый стол «Применение искусственного интеллекта для изучения биологических объектов»

Тезисы

Abstracts

Морская геология

Устные доклады

Marine Geology

Oral presentations

УДК 551.463.8

Рубрика 38.61.17

ПОТОК ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ДНО В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ
РОССИИ: СОПОСТАВЛЕНИЕ СРЕДНЕГОДОВЫХ РАСЧЕТНЫХ И
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ СЕДИМЕНТАЦИОННЫХ ЛОВУШЕК

ORGANIC CARBON FLUX TO THE BOTTOM IN THE RUSSIAN ARCTIC SEAS:
COMPARISON OF ANNUAL AVERAGE CALCULATED AND RESEARCH
INSTRUMENT DATA FROM SEDIMENT TRAPS

**Новигатский Александр Николаевич, Клювиткин Алексей Андреевич,
Кравчишина Марина Даниловна, Политова Надежда Вячеславовна, Филиппов
Александр Сергеевич, Шевченко Владимир Петрович**

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

**Novigatsky Alexander Nikolaevich, Klyuvitkin Alexey Andreevich, Kravchishina Marina
Danilovna, Politova Nadezhda Vyacheslavovna, Filippov Alexander Sergeevich,
Shevchenko Vladimir Petrovich**

Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Введение

Взвешенное органическое вещество (ВОВ) является важнейшим компонентом взвеси, к которой относят все частицы, выделяемые фильтрацией через различные фильтры (размер пор 0.1–0.6 мкм) или собираемые седиментационными ловушками. ВОВ является по массе вторым после растворенного органического вещества (РОВ) компонентом океанической экосистемы и играет важную роль во всех биогеохимических процессах и круговоротах веществ в океане [Romankevich, Vetrov, 2021; Tanioka et al., 2022]. Погружение твердых частиц органического углерода является ключевым компонентом углеродного цикла океана и играет важную роль в глобальной климатической системе [Lutz et al., 2007; Lima et al., 2014; Isson et al., 2020]. По сравнению с другими районами мирового океана полярные моря оказывают большое влияние на содержание CO₂ в атмосфере, в основном из-за охлаждения поверхностных вод. Одним из способов, которым фотосинтетически фиксированный углерод становится недоступным для атмосферы, является гравитационное опускание твердых частиц органического углерода на дно [Wassmann et al., 2004; Honjo et al., 2008]. Несмотря на большие усилия [Lutz et al., 2002; Vetrov, Romankevich, 2014], до сих пор нет достаточно надежных данных, позволяющих согласовать массы и потоки взвешенного органического вещества в системе фотический слой–морское дно, а также иметь ясную динамическую картину его поведения в разных зонах океана [Mouw et al., 2016; Friedlingstein et al., 2020].

В настоящей работе мы попытались сравнить расчетные результаты по первичной продукции среднегодовых потоков органического углерода на дно в морях Российской Арктики со среднегодовыми данными придонных седиментационных ловушек, чтобы получить представление о существовании погрешностей и неопределенности в оценках потока ВОВ.

Материалы и методы

Региональные, сезонные и межгодовые вариации количества и состава основной массы ВОВ в морях и океанах определяются главным образом первичной продукцией фитопланктона. Отношения между потоком взвешенного органического углерода и глубиной обычно описываются единым степенным законом или рациональным уменьшением с глубиной, пересчитанным на первичную продукцию [Lutz et al., 2007; Romankevich, Vetrov, 2021]. На основе карт среднегодовой первичной продукции арктических морей были рассчитаны карты среднегодового потока $C_{орг}$ на дно (рис. 1) [Vetrov, Romankevich, 2014]. Поток органического углерода на дно рассчитывается с использованием эмпирической зависимости $F_c = 33 \text{ ПП}/Z$, где ПП – величина первичной продукции в столбе воды, а Z – глубина [Romankevich, Vetrov, 2021].

Исследования потоков литогенных и биогенных частиц с помощью долговременных (более года) седиментационных ловушек в северных высоких широтах еще очень редки и ограничены арктическими окраинными морями и субарктическими районами [Fahl et al., 2007; Lalande et al., 2009; Honjo et al., 2010; Forest et al., 2013; Novigatsky et al., 2020; Nöthig et al., 2020; Agafonova et al., 2023]. Метод седиментационных ловушек [Honjo, Doherty, 1988; Lukashin et al., 2011] позволяет достаточно уверенно определять придонные вертикальные потоки ($\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$) взвешенного органического углерода ($C_{орг}$), несмотря на некоторые неопределенности в виде активной придонной гидродинамики, нефелойдных слоев, суточной миграции зоопланктона и др.

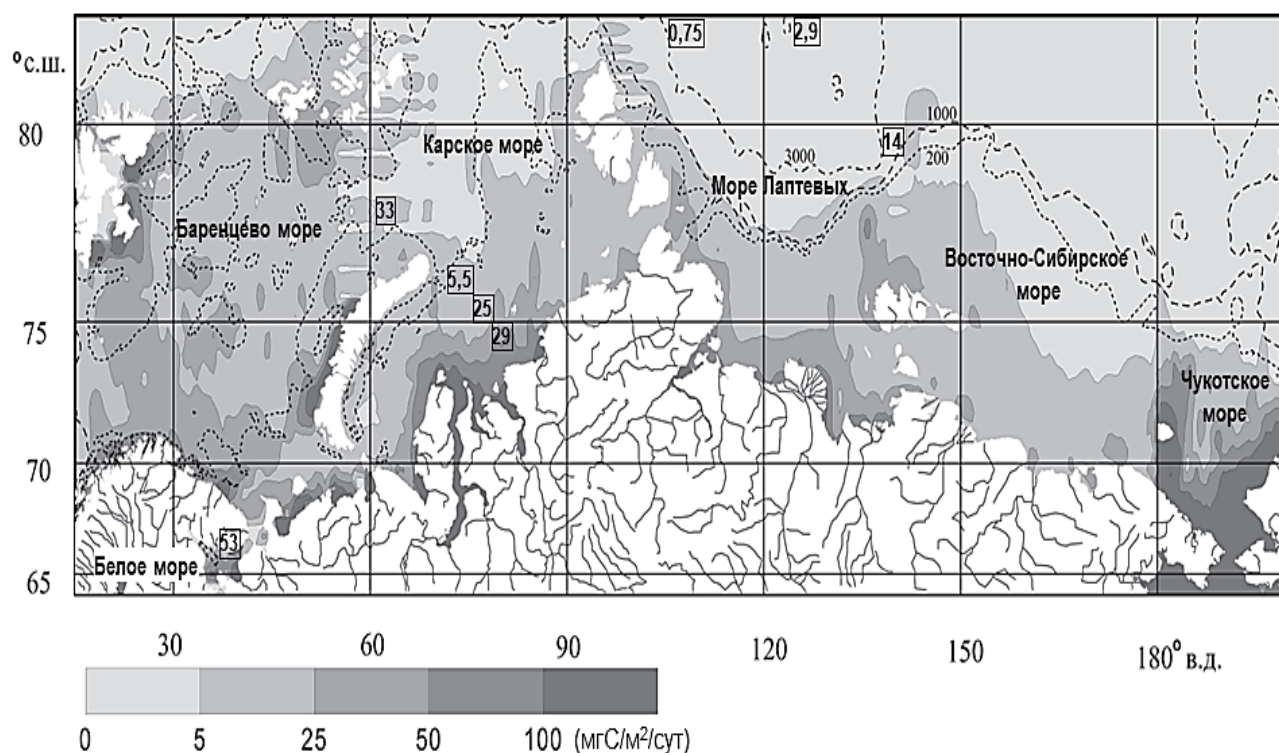


Рис. 1. Карта-схема расчетного по первичной продукции среднегодового потока органического углерода ($\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$) на дно в Арктических морях России [Vetrov, Romankevich, 2019; Romankevich, Vetrov, 2021] в сопоставлении со среднегодовыми инструментальными данными седиментационных ловушек установленных в придонном горизонте, цифрами показано: Белое море 53 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Novigatsky et al., 2020], Баренцево море 33 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Agafonova et al., 2023], Карское море 5,5 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Drits et al., 2021], 25 и 29 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Gaye et al., 2007], Море Лаптевых 0,75 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Nöthig et al., 2020], 2,9 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Fahl et al., 2007], 14 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$ [Lalande et al., 2009].

Результаты и обсуждение

Потери органического вещества (ОВ) в толще вод определяется разложением и оседанием детрита планктона, фекальных пеллет и различных новообразованных агрегатов (фрагменты растительного и животного происхождения населенные микрофлорой) [Agatova, 2014]. Пеллетный транспорт является основным механизмом поступления взвешенного ОВ на дно [Stein, MacDonald, 2004]. Наиболее важную роль в активном биотранспорте играют фильтраторы зоопланктона, которые связывают тонкую взвесь в комки пеллеты, способствуют сохранению ОВ, его быстрому удалению из верхнего фотического слоя. При отсутствии такого механизма подавляющая часть взвешенного ОВ не могло бы проникнуть в глубины океана и войти в состав донных осадков. Активная вертикальная ежесуточная миграция фильтрующего зоопланктона является дополнительным механизмом транспорта, что способствует поступлению ОВ в глубины морей и океана. По некоторым оценкам скорость погружения пеллет варьирует от <10 до 2500 м в сутки, в среднем составляя 760 м/сут [Romankevich, Vetrov, 2021], т.е. на шельфе достаточно суток для поступления пеллет на дно. Таким образом, главными факторами, определяющими скорость оседания, являются размер пеллет, их плотность и глубина бассейна.

Взвешенное органическое вещество на 40–90% оседает в эстуарных зонах и на прилегающем шельфе, составляя основную долю потока на дно органического углерода, что подтверждается нашими многолетними исследованиями с помощью седиментационных ловушек в Белом и Баренцевом морях [Novigatsky et al., 2020; Agafonova et al., 2023] (рис. 1).

Существующая особенность Карского моря в арктической экосистеме обусловлена поступлением наибольшего количества континентального стока, так р. Обь и Енисей переносят более 40% речного стока внутри всего Арктического бассейна [Stein, MacDonald, 2004]. На шельфе Карского моря происходит активная геохимическая и биологическая трансформация вещества, переносимого континентальным стоком, потоки органического углерода на дно постепенно уменьшаются от суши в мористую часть с 29 до 5,5 мгС/м²/сут [Gaye et al., 2007; Drits et al., 2021] (рис. 1).

Со временем часть осадков, обогащенных ОВ, под действием течений, гравитации и тектонических движений перезахоранивается в области нижней части континентального склона и его подножия. Это определяет высокое содержание ОВ на шельфе и континентальном склоне арктических морей (Море Лаптевых) [Fahl et al., 2007; Lalande et al., 2009; Nöthig et al., 2020] (рис. 1). Обычно считают, что дна достигает в среднем от 1 до 5% продукции фитопланктона [Lutz et al., 2002; Romankevich, Vetrov, 2021].

В Северном Ледовитом океане особую роль играют Арктические моря России, накапливая органическое вещество преимущественно планктоногенного генезиса (Баренцево и Чукотское моря) и органическое вещество преимущественно терригенного генезиса (Белое, Карское, Лаптевых и Восточно-Сибирское моря) [Vetrov, Romankevich, 2019; Romankevich, Vetrov, 2021]. Устойчивость к разложению терригенного, речного и смешанного планктонно-терригенного и термоабразионного органического вещества, которое преобладает в морях Российской Арктики, определяет, что на единицу площади Арктических морей в донных осадках захоранивается более чем в два раза больше органического вещества, чем в среднем на шельфе Мирового океана [Vetrov, Romankevich, 2019; Romankevich, Vetrov, 2021].

Заключение

Для распределения взвешенного ОВ в морях Российской Арктики характерны циркумконтинентальная и вертикальная зональности. Они выражаются в уменьшении концентрации и потоков (мгС/м²/сут) взвешенного органического углерода при переходе от приконтинентальных к пелагическим районам Северного Ледовитого океана, а так же от поверхностного фотического слоя к придонному на два порядка, что подтверждается

инструментальными данными седиментационных ловушек и коррелирует с зональностью биопродукционных процессов.

Однако редкость и относительно большая неопределенность данных по годовым потокам органического углерода полученных методом седиментационных ловушек затрудняют точную оценку. Необходимы дополнительные наблюдения за потоками взвешенного органического углерода в более широком диапазоне экологических режимов, чтобы тщательно оценить и проверить расчетные результаты моделирования по первичной продукции и лучше понять процессы, контролирующие поток взвешенного органического углерода на глубину в океане.

Непрерывные наблюдения с помощью седиментационных ловушек открывают новые возможности для океанологии – наблюдения во времени от суток до многих лет. Есть все основания рекомендовать метод седиментационных обсерваторий, обеспечивающих непрерывный ряд данных, для широкого внедрения в изучение морей Российской Арктики, основную часть года покрытых льдом и недоступных для исследований.

Финансирование

Обработка материала выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-17-00234-П. В рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0016 осуществлялась интерпретация полученных данных.

Список литературы:

1. Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A., Kravchishina M., Klyuvitkin A., Bulokhov A. Diatom and Dinocyst Production, Composition and Flux from the Annual Cycle Sediment Trap Study in the Barents Sea // *Geosciences*. – 2023. – V. 13(1). doi:10.3390/geosciences13010001
2. Agatova A.I. Biochemical Approaches to Estimates of the World Ocean Productivity // *Proceedings of VNIRO*. – 2014. – V. 152. – P. 15–40. ISSN: 2307-3497
3. Drits A.V., Kravchishina M.D., Sukhanova I.N., Belyaev N.A., Karmanov V.A., Flin, M.V. Seasonal Variability in the Sedimentary Matter Flux on the Shelf of the Northern Kara Sea // *Oceanology*. – 2021. – V. 61(6). – P. 984–993. doi:10.1134/S0001437021060217
4. Fahl K., Nöthig E. M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. – 2007. – V. 54(8). – P. 1256–1272 doi:10.1016/j.dsr.2007.04.014
5. Forest A., Babin M., Stemmann L., Picheral M., Sampei M., Fortier L., Gratton Y., Belanger S., Devred E., Sahlin J., Doxaran D., Joux F., Ortega-Retuerta E., Martin J., Jeffrey W.H., Gasser B., Carlos Miquel J. Ecosystem function and particle flux dynamics across the Mackenzie Shelf (Beaufort Sea, Arctic Ocean): an integrative analysis of spatial variability and biophysical forcings // *Biogeosciences*. – 2013. – V. 10(5). – P. 2833–2866. doi:10.5194/bg-10-2833-2013
6. Friedlingstein P., O'sullivan M., Jones M. W., Andrew R. M., Hauck J., Olsen A., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Quéré C.L., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Alin S., Aragão L.E.O.C., Arneeth A., Arora V., Bates N.R., Becker M., Benoit-Cattin A., Bittig H.C., Bopp L., Bultan S., Chandra N., Chevallier F., Chini L. P., Evans W., Florentie L., Forster P. M., Gasser T., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Gregor L., Gruber N., Harris I., Hartung K., Haverd V., Houghton R. A., Ilyina T., Jain A.K., Joetzjer E., Kadono K., Kato E., Kitidis V., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Liu Z., Lombardozzi D., Marland G., Metzl N., Munro D.R. Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Niwa Y., O'Brien K., Ono T., Palmer P.I., Pierrot D., Poulter B., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., P. Smith A.J., Sutton A.J., Tanhua T., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Werf G., Vuichard N., Walker A.P., Wanninkhof R., Watson A. J., Willis D.,

- Wiltshire A.J., Yuan W., Yue X., Zaehle S. Global carbon budget 2020 // *Earth System Science Data*. – 2020. – V. 12(4). – P. 3269–3340. doi:10.5194/essd-12-3269-2020
7. Gaye B., Fahl K., Kodina L.A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., Gebhardt A. C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids // *Continental Shelf Research*. – 2007. – V. 27(20). – P. 2570–2594. doi:10.1016/j.csr.2007.07.0030
 8. Honjo S., Doherty K.W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application // *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. – 1988. – V. 35(1). – P. 133–149. doi: 10.1016/0198-0149(88)90062-3
 9. Honjo S., Manganini S.J., Krishfield R.A., Francois R. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983 // *Progress in Oceanography*. – 2008. – V. 76(3). – P. 217–285. doi:10.1016/j.pocean.2007.11.003
 10. Honjo S., Krishfield R.A., Eglinton T.I., Manganini S J., Kemp J.N., Doherty K., Hwang J., McKee T.K., Takizawa T. Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise // *Progress in Oceanography*. – 2010. – V. 85(3–4). – P. 137–170. doi:10.1016/j.pocean.2010.02.009
 11. Isson T.T., Planavsky N.J., Coogan L.A., Stewart E.M., Ague J.J., Bolton E.W., Zhang S., McKenzie N.R., Kump L.R. Evolution of the global carbon cycle and climate regulation on earth // *Global Biogeochemical Cycles*. – 2020. – V. 34(2). – P. e2018GB006061. doi:10.1029/2018GB006061
 12. Lalande C., Bélanger S., Fortier L. Impact of a decreasing sea ice cover on the vertical export of particulate organic carbon in the northern Laptev Sea, Siberian Arctic Ocean // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – V. 36(21). – P. L21604. doi:10.1029/2009GL040570
 13. Lima I.D., Lam P.J., Doney S.C. Dynamics of particulate organic carbon flux in a global ocean model // *Biogeosciences*. – 2014. – V. 11(4). – P. 1177–1198. doi:10.5194/bg-11-1177-2014
 14. Lukashin V.N., Klyuvitkin A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N. The MSL-110 small sediment trap // *Oceanology*. – 2011. – V. 51(4). – P. 699–703. doi:10.1134/S0001437011040126
 15. Lutz M., Dunbar R., Caldeira K. Regional variability in the vertical flux of particulate organic carbon in the ocean interior // *Global biogeochemical cycles*. – 2002. – V. 16(3). – P. 1037. doi:10.1029/2000GB001383
 16. Lutz M.J., Caldeira K., Dunbar R.B., Behrenfeld M.J. Seasonal rhythms of net primary production and particulate organic carbon flux to depth describe the efficiency of biological pump in the global ocean // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. – 2007. – V. 112(C10). doi:10.1029/2006JC003706
 17. Mouw C.B., Barnett A., McKinley G.A., Gloege L., Pilcher D. Global ocean particulate organic carbon flux merged with satellite parameters // *Earth System Science Data*. – 2016. – V. 8(2). – P. 531–541. doi:10.5194/essd-8-531-2016
 18. Novigatsky A.N., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical Fluxes of Suspended Particulate Matter and Absolute Masses of Bottom Sediments // *Oceanology*. – 2020. – V. 60(3). – P. 372–383. doi:10.1134/S0001437020030078
 19. Nöthig E-M, Lalande C, Fahl K, Metfies K, Salter I, Bauerfeind E. Annual cycle of downward particle fluxes on each side of the Gakkel Ridge in the central Arctic Ocean // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. – 2020. – V. 378(2181). – P. 20190368. doi:10.1098/rsta.2019.0368
 20. Romankevich E.A., Vetrov A.A. Carbon in the World Ocean / GEOS. Moscow. – 2021. – P. 131–156. doi:10.34756/GEOS.2021.16.37857
 21. Stein R., MacDonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean / Springer, Berlin–New York. – 2004. – P. 169–314. ISBN: 978-3-642-18912-8
 22. Tanioka T., Larkin A.A., Moreno A R., Brock M.L., Fagan A.J., Garcia C.A., Garcia N.S., Gerace S.D., Lee J.A., Lomas M.W., Martiny A.C. Global Ocean Particulate Organic

- Phosphorus, Carbon, Oxygen for Respiration, and Nitrogen (GO-POPCORN) // Scientific Data. – 2022– 9(1). – P. 688. doi:10.1038/s41597-022-01809-1
23. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012 // Doklady Earth Sciences. – 2014. – V. 454. – P. 44–46. doi:10.1134/S1028334X14010073
24. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Distribution, fluxes, and balance of particulate organic carbon in the Arctic Ocean // Oceanology. – 2019. – V. 59(4). – P. 491–499. doi:10.1134/S0001437019040180
25. Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.-M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. – 2004. – P. 101–138. doi:10.1007/978-3-642-18912-8_5

УДК 550.4.02

Рубрика 38.33.17

ГАЗОГИДРАТНЫЕ ПРОВИНЦИИ НА ШЕЛЬФЕ И СКЛОНЕ ОСТРОВА САХАЛИН
GAS HYDRATE PROVINCES ON THE SHELF AND SLOPE OF SAKHALIN ISLAND

Сырбу Надежда Сергеевна¹, Холмогоров Андрей Олегович¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН), Владивосток, Россия

Syrbu Nadezhda Sergeevna¹, Kholmogorov Andrei Olegovich¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok City (Russia)

Введение

Проблема скопления газогидратов в Мировом океане также актуальна в долгосрочной перспективе. Изменение климата является общей проблемой для всего человечества, и выбросы парниковых газов являются наиболее важной причиной потепления климата. Являясь одним из крупнейших источников органического углерода на земле, гидрат природного газа при разложении выделяет огромное количество метана, что может оказать важное воздействие на морскую среду и глобальный климат (Collett et al., 2009).

Морские гидраты в основном распределены в неглубоком слое донных отложений (от десятков до сотен метров). В условиях глобального потепления (повышение температуры морского дна) или понижения уровня моря (пониженное давление) газогидраты с большим количеством углерода могут разлагаться и выделять огромное количество метана.

Одним из наиболее важных вопросов, связанных с оценкой взаимодействия климата и гидратов, является установление места залегания газовых гидратов. Около 99% газовых гидратов образуется в морских отложениях (McIver, 1981) на континентальных склонах на глубинах более ~500 м в умеренных широтах и ~300 м в высоких широтах, где придонные воды холоднее. Эти глубины обозначают самый мелкий предел P-T (давление – температура) для зоны стабильности газогидратов (GHSZ) на континентальных склонах, где зона стабильности исчезает. В море такие условия могут создаваться за счет прохождения холодных водных масс. В то же время измерения температуры следует проводить не только в осадках, но и в толще воды, рассматривая ее как неотъемлемую часть системы, включая гидратсодержащие осадки (Веселов и др., 2006). Ниже по склону GHSZ в осадочном разрезе утолщается по мере увеличения давления и в конечном итоге может охватить несколько верхних сотен метров отложений в водах глубиной более 1000 м. (Руппель, Кессле, 2017). Газогидраты, обнаруженные на глубине 320 м в Татарском проливе, являются уникальным случаем для зоны 48° Северной широты, ключевым моментом здесь является то, что холодные субарктические воды поступают сюда из Охотского моря и формируют надлежащий температурный режим. Для образования и существования газовых гидратов требуется несколько условий, таких как стабильное интенсивное поступление газа, надлежащая температура и давление. Западно-Сахалинский шельф отвечает всем этим требованиям.

Температурный режим в подповерхностном слое отложений (где залегают газогидраты) зависит как от придонной воды, так и от теплового потока, воздействующего на отложения сверху и снизу. Использование информации о тепловых потоках для районирования газовых

гидратов, картирования аномалий, выявления связей с тектоническими структурами и т.д. дает положительный результат при построении схемы эндогенных режимов, выявлении зон разломно-магматической активации, построении тектонических карт и т.д. (Веселов и др., 2006). Кроме того, региональная сейсмическая обстановка является важным фактором, влияющим на режим выброса газа из литосферы. В нашей статье представлено районирование газогидратных провинций на основе геологических, геофизических, сейсмических и океанографических характеристик шельфа и склона острова Сахалин.

Данные и методы

Анализ литературных геолого-геофизических данных показывает, что наиболее благоприятными областями для возникновения подводной разгрузки метана в Японском (Татарский пролив) и Охотском морях являются восточные шельф и склон острова Сахалин и западная часть впадины Дерюгина, в Японском море – юго-западный шельф и склон острова Сахалин. Проведено районирование зон залегания газовых гидратов в Япономорской и Охотоморской акваториях острова Сахалин.

Использованы данные газогеохимических исследований и измерений CTD, выполненных во время морских экспедиций на RV “Академик М.А. Лаврентьев”, круиз 62 (LV62) в июне 2013 г. и круиз 70 (LV70) в июне 2015 г. Температура донных отложений в Татарском проливе была определена во время морской экспедиции на RV “Академик Опарин”, 61-й рейс в ноябре-декабре 2020 года. Температуру измеряли с помощью прибора TESTO 735-2 с погрешностью измерения 0,2с.

Также, для сравнения с рассмотренными районами, мы привлекли сахалинские данные проекта по газогидратам (SSGH) за 2007-2012 годы в рамках международного сотрудничества ученых из Японии, России и Германии по исследованию скоплений гидратов природного газа на северо-восточном континентальном склоне острова Сахалин (Отчет об эксплуатации, 2008; Отчет об эксплуатации, 2011).

Методики газогеохимических исследований утверждено Свидетельством Росстандарта № 58 от 21.12.2021 к паспорту лаборатории ПС 1.051–21.

Результаты

На Сахалине вдоль разломов глубокого заложения отмечаются линейно расположенные пояса интрузивов [Равдоникас, 1986], проявления древнего вулканизма, активные грязевые вулканы, нефтегазопроявления, гидротермальные изменения пород (окварцевание, карбонатизация) и рудопроявления. Флюидные системы, находясь в непрерывном движении, участвуют в перераспределении напряженно-деформированного состояния земной коры. Они определяют современную активность разломов, расположенных в сейсмоактивных и платформенных областях [Осика, 1981]. Согласно ранее проведенным газогеохимическим исследованиям на острове Сахалин выделено две эколого-газогеохимические зоны первого порядка: Метановая и Углекисло-Метановая [Shakirov, Syrбу, 2013].

На основе анализа литературных и фондовых данных по углегазоносным и нефтегазоносным районам, а также авторских данных по грязевым вулканам и Дагинской газогидротермальной системе были установлены особенности распределения метана и углекислого газа на о. Сахалин [Shakirov, Syrбу, 2013], которые показали, что в северо-восточной и восточной части острова системы газовой разгрузки представлены главным образом метаном, при этом углекислый газ наблюдается в минимальных концентрациях. И, напротив, в западной и юго-западной части острова расположены объекты, в которых углекислый газ является основным компонентом (грязевые вулканы, водоминеральные источники) или составляет значительную

часть (угольные залежи), при этом также увеличена доля углеводородных газов ряда этан-пентан.

Полученные данные распределения метана и углекислого газа на водоминеральных участках газовой разгрузки подтвердили наличие двух газогеохимических зон (рис. 2).

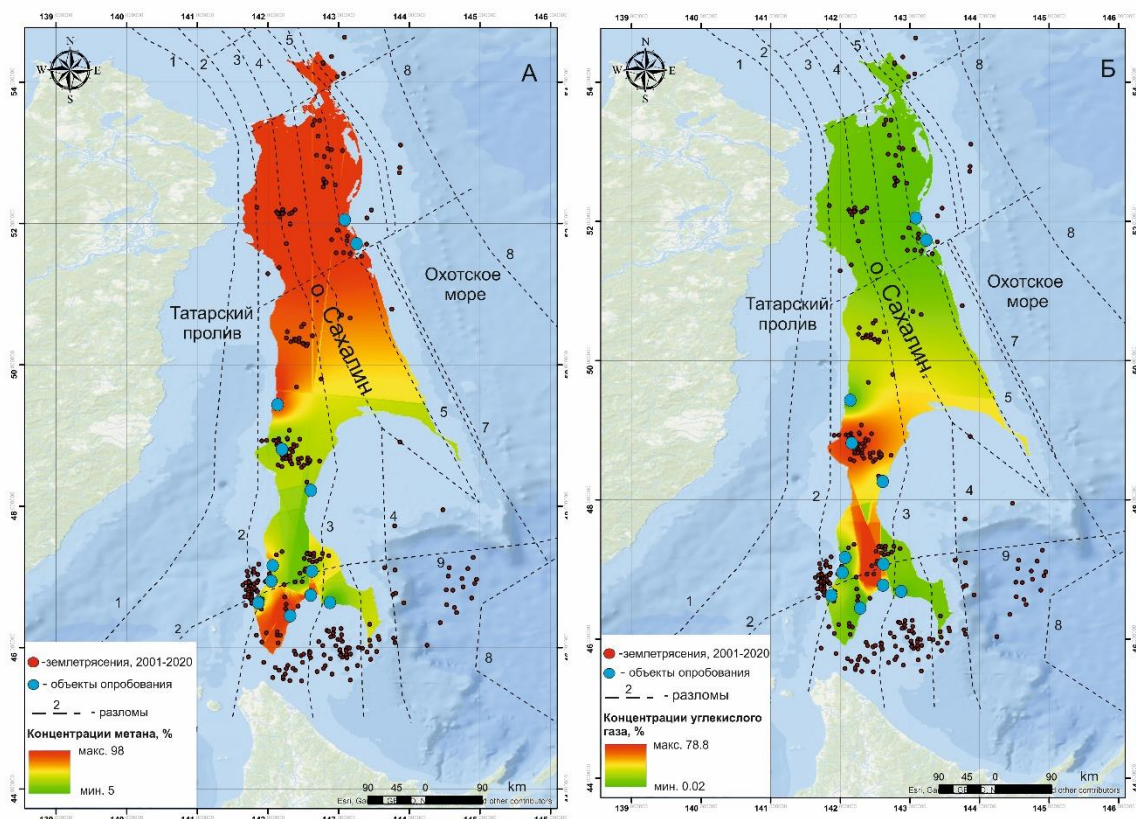


Рис. 2. Карта распределения метана (А) и углекислого газа (Б) на острове Сахалин по результатам опробования термальных и минеральных вод

Региональные разломы: 1 — Восточно-Сихотэ-Алиньский, 2 — Западно-Сахалинский, 3 — Центрально-Сахалинский, 4 — Хоккайдо-Сахалинский, 5 — Северо-Сахалинский, 6 — Трехбратский, 7 — Пограничный, 8 — Восточно-Сахалинский, 9 — Стародубский [Ломтев, Жердева, 2015].

Особенности проявления полей метана и углекислого газа на о. Сахалин отражает различие в геологическом строении северо-восточной и юго-западной частей острова.

На севере основные нефтегазопроявления приурочены к кайнозойским отложениям (средний и верхний миоцен, плиоцен) накопленных в морских условиях и контролируются субмеридиональными разломами сдвигового типа, которые служат основными каналами для миграции газов и флюидов. Современная активная миграция вдоль разломов подтверждается многочисленными нефтегазопроявлениями, термальными и минеральными источниками, газовыми аномалиями. Во время сеймотектонической активности увеличивается миграции флюидов и потоков газа. Остров Сахалин характеризуется высокой сейсмичностью, обусловленной его местоположением на стыке Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит. Сейсмичность острова связана с субмеридиональными глубинными разломами, разделяющими Охотоморскую литосферную плиту от Евразийской. Движение этих плит друг относительно друга, а также развитие спрединговых процессов в рифтовой структуре Татарского пролива, приводят к активной сейсмичности [Родников и др., 2014].

Для южной части Сахалина характерны преимущественно континентальные терригенные отложения нижнемелового, верхнемелового и палеоген-неогенового возраста, при этом в ряде случаев органическое вещество может иметь также морской генезис [Полоник и др., 2015]. К зонам разломов приурочены разновозрастные интрузии.

Для северной части острова Сахалин характерны повышенные показатели концентрации метана по сравнению с его южной частью. Примечательно, что также повышенные показатели наблюдаются и над северной частью акватории, где в пределах Северо-Сахалинского осадочного бассейна расположены основные проявления нефти и газа, также на северо-восточном шельфе и склоне известны залежи газовых гидратов [Ginsburg et al., 1993; Minami et al., 2012; Kim et al., 2013].

По результатам исследования термальных и минеральных также можно выделить зону повышенных концентраций гелия и водорода в юго-западной части острова Сахалин (рис. 3). В центральном Сахалине, в районе Синегорских, Волчанских и Лесогорских минеральных источников расположено локальное поле повышенных концентраций гелия (от 315 до 625 ppm). Образование контрастного распределения поля гелия коррелирует с системой разломов и зонами проницаемости, а также выходами гранитоидов в пределах центрального Сахалина (лангерийский гранодиоритовый комплекс) [Александров и др., 2018].

Глубина сахалинских сдвигов определена по глубине очагов землетрясений – 15-20 км. По данным сейсмических исследований [Николаевский, Рамазанов, 1986] таким глубинам соответствуют зоны трещиноватости, насыщенные флюидами, соединяющиеся с вертикальными разломами сдвигового типа. В таких местах происходит активная миграция газов. Вдоль Хоккайдо-Сахалинского и Центрально-Сахалинского разломов вертикальная амплитуда смещения блоков составляет 400-600 м. В периоды землетрясений в районе глубоких тектонических прогибов, вероятно, может происходить процесс смешивания глубинных флюидов и седиментогенных растворов, содержащих углеводородные газы, а гелий и водород и др. Во время сейсмо-тектонического сдвига происходит миграция флюидов в проницаемые зоны. Флюиды заполняют трещины и выдавливаются вверх по разлому. Если разлом перекрыт осадочным чехлом (северо-восточная часть Сахалина), то флюиды скапливаются в пластах пористых и трещиноватых пород, а если разлом сообщается с земной поверхностью (южная и юго-западная часть Сахалина), то флюиды выходят на поверхность.

Заключение

Наиболее важным следствием проведенных многолетних исследований является выявление тесной связи современной динамики геологической среды и флюидодинамики в виде вертикальной миграции флюидов из фундамента, внутри осадочного чехла и до поверхности, которая происходит в зонах проводящих разломов и отражается в вариациях геохимических полей.

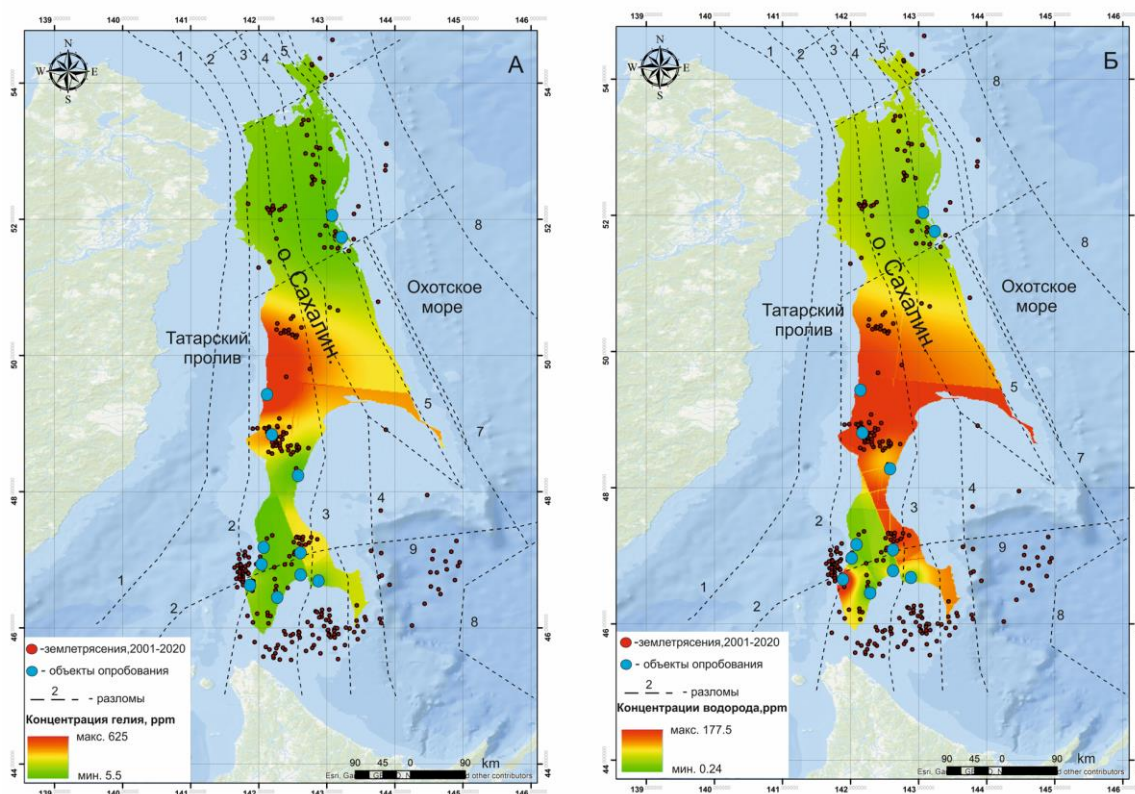


Рис. 3. Карта распределения гелия (А) и водорода (Б) на острове Сахалин по результатам опробования термальных и минеральных вод

Региональные разломы: 1 — Восточно-Сихотэ-Алиньский, 2 — Западно-Сахалинский, 3 — Центрально-Сахалинский, 4 — Хоккайдо-Сахалинский, 5 — Северо-Сахалинский, 6 — Трехбратский, 7 — Пограничный, 8 — Восточно-Сахалинский, 9 — Стародубский [Ломтев, Жердева, 2015].

Исследования приобретают особую актуальность в соответствии с ожидаемыми приоритетами Десятилетия наук об океане ООН в интересах устойчивого развития (2021-2030 гг.), Рабочей группы ВЕСТПАК по комплексному изучению газовых гидратов и потоков метана в Индо-Тихоокеанском регионе (CoSGas), бурное развитие морских исследований стран БРИКС.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-10038.

Список литературы

1. Александров И. А., Ч.-П Ляо (С.-Р. Liao), Б.-М Чжан (В.-М. Sahn), Голозубов В.В., Ивин В. В., Степнова Ю.А. Эоценовый возраст гранитоидов Охотского гранодиоритового комплекса (южный Сахалин) // ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК. – 2018. – Т. 483. – № 5. – С. 528–532.
2. Ломтев В.Л., Жердева О.А. К сеймотектонике Сахалина: новые подходы // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2015. – № 3. – С. 56-68.

3. *Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К.* Генерация и распространение волн вдоль глубинных разломов // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1986. – № 10. – С. 3.
4. Нормативно-методическое обеспечение охраны атмосферного воздуха. Т. 2. Пермь: ИНТЕРЭКО. – 1995. – 249 с.
5. *Обжиров А.И.* Газогеохимические поля придонного слоя морей и океанов. М.: Наука. – 1993. – 139 с.
6. *Осика Д.Г.* Флюидный режим сейсмически активных областей. М.: Наука. – 1981. – 203 с.
7. *Полоник Н.С., Шакиров Р.Б., А.В. Сорочинская, Обжиров А.И.* Изучение состава углеводородных компонентов Южно-Сахалинского и Пугачевского грязевых вулканов // Доклады академии наук. – 2015. – Т. 462. – № 1. – С. 79–83.
8. *Поротов Г.С.* Математические методы при поисках и разведке полезных ископаемых. Учеб. пособие. Л.: изд-во ЛГИ. – 1977. – 106 с.
9. *Равдоникас О.В.* Нефтепоисковая гидрогеология Сахалина. Владивосток. – ДВНЦ АН СССР. – 1986. – 167 с.
10. *Родников А. Г., Забаринская Л. П., Сергеева Н. А.* Глубинное строение сейсмоопасных регионов Земли (о. Сахалин) // ВЕСТНИК ОНЗ РАН. – 2014. – Т. 6. – NZ1001.
11. *Смирнов Б.В.* Вероятностные методы прогнозирования в инженерной геологии. М.: Недра. – 1983. – 134 с.
12. *Ginsburg G.D., Soloviev V.A., Cranston, R.E., Lorenson T., & Kvenvolden K.A.* Gas hydrates from the continental slope, offshore Sakhalin Island, Okhotsk Sea // Geo-Marine Letters. – 1993. – 13. – P. 41-48.
13. *Kim Y., Lee S., Jin Y.K., Baranov B.V., Obzhirov A.I., Salomatin A.S., & Shoji H.* The stability of gas hydrate field in the northeastern continental slope of Sakhalin Island, Sea of Okhotsk, as inferred from analysis of heat flow data and its implications for slope failures // Marine and Petroleum Geology. – 2013. – 45. – P. 198-207.
14. *Minami H., Tatsumi K., Hachikubo A., Yamashita S., Sakagami H., Takahashi N., Shoji H., Jin Y., Obzhirov A., Nikolaeva N., & Derkachev A.* Possible variation in methane flux caused by gas hydrate formation on the northeastern continental slope off Sakhalin Island, Russia // Geo-Marine Letters. – 2012. – 32(6). – P. 525-534.
15. *Shakirov R. B., Syrbu N. S.* Natural Sources of Methane and Carbon Dioxide on Sakhalin Island and Their Role in the Formation of Ecological GasGeochemical Zones // Water Resources. – 2013. – Vol. 40. – No. 7. – P. 752–760.
16. *Tsunogai U., Kosaka A., Nakayama N., Komatsu D., Konno U., Kameyama S., Nakagawa F., Sumino H., Nagao K., Fujikura K., Machiyama H.* Origin and fate of deep sea seeping methane bubbles at Kuroshima Knoll, Ryukyu forearc region, Japan // Geochemical Journal. 2010. – 44. – P. 461–476.
17. *Wiesenburg D.A., Guinasso N. L.* Equilibrium solubilities of methane, carbon monoxide and hydrogen in water and sea water // Journal of chemical and engineering data. – 1979. – V. 24. – № 4. – P. 356-360.

УДК 550.31

Рубрика 01.01.00

ХАРАКТЕРНЫЕ ВРЕМЕНА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РЕАКЦИИ ПОДДОННЫХ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ НА МГНОВЕННОЕ ВЫПАХИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ДНА ПРИ ДВИЖЕНИИ АЙСБЕРГА В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ

CHARACTERISTIC TIMES OF FORMATION OF THE REACTION PROCESS OF SUB BOTTOM GAS HYDRATE SUBJECTS TO THE INSTANTANEOUS PLOWING OF BOTTOM SURFACE DURING THE MOMENT OF THE ICEBERG MOVEMENT IN THE NORTHERN SEAS

Суетнова Елена Ивановна

ИФЗ РАН Москва

Suetnova Elena Ivanovna

IPE RAS Moscow

Наблюдавшиеся в рельефе дна в некоторых регионах северных морей следы выпахивания приповерхностного слоя киями айсбергов [1, 2, 3] ставят вопрос о влиянии этих процессов на геофизические процессы в структуре дна вследствие изменения термобарических условий в среде морской коры. Особенно интересно выяснить продолжительность такого влияния на поддонны газовые гидраты наличие которых обычно предполагается в северных морях. В данной работе приводится математическая формулировка постановки нестационарной задачи изменения температуры и давления в слое осадков при мгновенном удалении с поверхности слоя мощностью L . Приводится пример решения который наглядно показывает длительность процесса изменения распределения температуры в осадках и тем самым длительность изменения глубины границы зоны потенциальной стабильности газовых гидратов в случаях наличия газосодержащего флюида под зоной произошедшего выпахивания.

Исследование влияния эрозии на изменение температурного режима дна производится с помощью математического моделирования процесса изменения температуры среды дна вследствие эрозии на глубину L в определённый момент времени.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + A_1 \frac{\partial m \cdot V_f \cdot f}{\partial z} = \kappa \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

$$\text{Где } A_1 = \frac{\rho_f \cdot C_f}{\rho C} ;$$

f – температура; C – теплоемкость; v_f – скорость фильтрации ρ_f – плотность, κ – температуропроводность, t – время, z – координата, m – пористость .

Решая это уравнение аналитически получаем что изменение температуры в морском дне на глубине z_1 после эрозии слоя мощности L при условии, что начальный градиент температуры был равен b определяется выражением

$$bL \operatorname{erf}(z_1 / (2\sqrt{\kappa t}))$$

Полученное решение позволяет нам определять положение новой зоны термобарической стабильности газовых гидратов для каждого момента времени истории действия эрозии на тепловые условия в дне.

В случае гидростатического градиента порового давления в осадках до эрозии из решения уравнения следует что процесс эрозии не приводит к разложению газовых гидратов ниже поверхности дна и разложение только сопутствует разрушению в эродируемом слое.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания лаборатории.

Список литературы:

1. Ottesen D., Dowdeswell J.A., Landvik J.Y., Mienert J. Dynamics of the Late Weichselian ice sheet on Svalbard inferred from high-resolution sea-floor morphology// *Boreas*. 2007. V. 36. P. 286–306.
2. Piasecka, E.D. and Winsborrow, M.C.M. and Andreassen, K. and Stokes, C.R. (2016) // *Quaternary science reviews.*, 151 . pp. 212-227 2.
3. 3. Karin Andreassen, Monica C.M. Winsborrow, Lilja R. Bjarnadóttir , Denise C. Rüther. Ice stream retreat dynamics inferred from an assemblage of landforms in the northern Barents Sea. *Quaternary Science Reviews* 92 (2014) 246e257.

УДК 550.849

Рубрика 38.57.01

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ФЛЮИДОВ В
 ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ
 INVESTIGATION OF LIQUID HYDROCARBONS DISGAGE IN THE UPPER PART OF
 THE SEDIMENTARY COVER OF THE NORTHERN KARA SEA

Сигачева Любовь Юрьевна¹, Видищева Олеся Николаевна¹, Полудеткина Елена Николаевна¹, Калмыков Антон Георгиевич¹, Ахманов Григорий Георгиевич¹

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

Sigacheva Lyubov Yuryevna¹, Vidischeva Olesya Nikolaevna¹, Poludetkina Elena Nikolaevna¹, Kalmykov Anton Georgievich¹, Akhmanov Grigorii Georgievich¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Введение

Карское море представляет собой одну из наиболее перспективных областей арктического континентального шельфа для поиска скоплений углеводородов. На долю этого региона приходится 55% начальных суммарных ресурсов углеводородов (УВ) акваторий Российской Арктики (Мельников и др., 2020). Шельф Карского моря подразделяется на два самостоятельных, отличных по геологическому строению осадочных бассейна – Южно-Карский и Северо-Карский. Все открытые на сегодняшний день месторождения сосредоточены в южной части Карского моря, являющейся продолжением Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна (Ступакова, 2011). Северная же часть акватории не изучена глубоким бурением, поэтому ее нефтегазовый потенциал до сих пор остается предметом дискуссий.

Геохимические исследования УВ соединений верхней части осадочного разреза служат эффективным способом прямой оценки УВ систем малоизученного региона. Методология поверхностных геохимических методов основана на представлениях, согласно которым над УВ залежами посредством диффузионно-фильтрационного массопереноса формируются аномальные поля, отличные по геохимическим характеристикам от фоновых полей.

Целью работы является обнаружение и изучение зон миграции УВ флюидов из очагов генерации к поверхности морского дна, а также характеристика вероятной материнской толщи, являющейся источником мигрирующих УВ. Классическая методика выявления признаков «дыхания» залежей подразумевает проведение исследований аномальных битуминологических полей по донным осадкам. В основе интерпретации данных лежит разделение исследуемого органического вещества (ОВ) на сингенетичное (собственное незрелое ОВ современных осадков) и миграционное (Соколова, Абля, 2007). Таким образом, анализируется смесь УВ разного генезиса. Для современного незрелого ОВ характерно большое количество термически нестабильных соединений, в частности, непредельных гопенов, биологических гопанов и моретанов, распределение которых накладывается на распределение катагенетически зрелых миграционных УВ. Это, в свою очередь, вызывает сложности в интерпретации результатов молекулярных исследований. Для устранения влияния «биологического» фона на миграционную компоненту, было выполнено

сопоставление фракционного и молекулярного составов УВ соединений приповерхностных осадков и горных пород, опробованных на больших глубинах.

Фактический материал

В работе приведены результаты изучения органического вещества (ОВ) верхней части осадочного разреза (до 50 метров) Северо-Карского бассейна. Фактический материал был отобран в пределах Краснофлотской террасы, где по сейсмическим данным было установлено резкое сокращение мощности осадочного чехла и близость к дневной поверхности палеозойских осадочных комплексов. Суммарно исследовано 17 образцов из трех станций. В каждой станции была проанализирована верхняя неконсолидированная часть разреза (до 5 метров) и нижняя часть, представленная разновозрастными (от раннего силура до позднего девона) консолидированными отложениями.

Методы исследования

Пиролитические исследования ОВ (до экстракции) были выполнены исключительно для образцов горных пород по методу Rock-Eval 6.

Для определения количества УВ соединений в образцах осадков и горных пород была выполнена горячая экстракция хлороформом со сбором экстракта в аппарате Сокслета. Экстракты разделялись на мальтены и асфальтены *n*-гексаном. Из мальтенов методом колоночной хроматографии были выделены насыщенные (*n*-гексаном), ароматические УВ (толуолом) и смолы (спирто-толуолом (1:1)).

Анализ молекулярного состава фракций УВ определялся методом хромато-масс-спектрометрии (ХМС) на газовом хроматографе Agilent 8890, соединенном с масс-селективным детектором 5977В с высокоэффективным источником ионизации Inert plus.

Результаты

Согласно результатам пиролитических исследований, во всех образцах горных пород содержание ОВ низкое. Параметр S_2 в среднем не превышает 0,2 мг УВ/г породы; среднее содержание органического углерода (ТОС) в образцах равно 0,4 мас.%. Это позволяет классифицировать данные горные породы как обладающие бедным генерационным потенциалом. Содержание свободных УВ в образцах также мало и не превышает 0,1 мг УВ/г породы. Только в образце 2.4 из станции 2 содержится наибольшее количество УВ соединений, его генерационный потенциал ($S_0+S_1+S_2$) равен 1,7 мг УВ/г породы. Таким образом, нефтематеринских толщ в разрезах станций выделено не было. В образцах содержатся миграционные битумоиды, которые могут быть исследованы комплексом геохимических методов.

Содержание растворимой части ОВ во всех образцах не превышает 0,2 мг УВ/г образца при среднем значении 0,13 мг УВ/г образца. Исключением являются осадки станции 3, для которых данный параметр варьирует от 0,23 до 2,08 мг УВ/г образца. Здесь же наблюдается отчетливый тренд уменьшения содержания УВ соединений с глубиной, в то время как в разрезах станций 1 и 2 аналогичная зависимость не выявлена.

Соотношение групп мальтенов и асфальтенов в анализируемых экстрактах неоднородно. В целом, для ОВ осадков станций характерна меньшая доля асфальтенов по сравнению с ОВ горных пород, залегающих глубже. Так, процентное содержание асфальтенов в экстрактах

осадков варьирует от 5,0 до 35,9% при среднем значении 17,8%. В экстрактах горных пород аналогичный параметр варьирует в пределах 16,7-75,0% при среднем значении 46,0%.

Тенденция «облегчения» состава экстрактов вверх по разрезу наблюдается и по соотношению насыщенной, ароматической фракций и смол в мальтенах. Исключением является разрез станции 1, для которой характерна скорее обратная зависимость. Наибольшее содержание насыщенной фракции в составе мальтенов (до 93,5%) установлено в осадках станции 3; в осадках станции 2 данное значение достигает 73,1%. Вероятно, это связано с процессами фракционирования мигрирующих по осадочному разрезу УВ соединений.

В насыщенной фракции ОБ осадков и горных пород была идентифицирована гомологическая серия *n*-алканов в диапазоне от *n*-C₁₁ до *n*-C₄₀, при этом гомологи с длиной цепи C₁₆ и менее содержатся в следовых количествах. В экстрактах из осадков, в отличие от экстрактов из горных пород, наблюдается сглаженная форма кривых, характеризующая «нефтяное» распределение *n*-алканов и не типичная для современного ОБ. Индекс СРІ, отражающий степень зрелости ОБ, в экстрактах осадков варьирует от 1,02 до 1,28. Следовательно, в осадках района исследований содержатся зрелые УВ флюиды, разгружающиеся из глубокопогруженных залежей. Аномальные распределения схожи между собой – максимум в них приходится на *n*-алкан состава C₂₆, что указывает на единый источник миграции. При этом в станции 1 присутствуют интервалы осадков с пониженной зрелостью ОБ. В них наблюдается «пилообразное», с явно выраженной нечетностью в области C₂₃-C₃₁, распределение *n*-алканов. Значения СРІ в этих образцах достигают 2,51. Для экстрактов образцов горных пород, в целом, характерно «пилообразное» распределение гомологов, с явно выраженным максимумом на *n*-C₂₅ и *n*-C₂₉. Значительно отличаются два экстракта из станции 1 (образцы 1.4 и 1.6). В них присутствует дополнительный максимум в высокомолекулярной области, приходящийся на *n*-алканы C₃₁-C₃₃. Вероятно, такое распределение характеризует остаточные битумоиды.

Согласно биомаркерным параметрам, экстракты из горных пород характеризуются несколько большим уровнем зрелости исходного ОБ по сравнению с экстрактами из осадков. Вместе с тем, значения, полученные для экстрактов из осадков, не соответствуют величинам, типичным для условий раннего диагенеза ОБ, а предполагают более глубокую степень преобразования. Это может указывать на обогащенность верхней части района исследований миграционными флюидами. В частности, значения отношения Ts/(Ts+Tm) в них достигают 0,45, H₂₉Ts/H₂₉ – 0,3, 22S/(22S+22R)C₃₁ – 0,54, а отношение моретана к гопану состава C₃₀ уменьшается до 0,11. Стерановые показатели bb/(aa+bb)C₂₉ и aa20S/(S+R)C₂₉ достигают в экстрактах осадков 0,6 и 0,44 соответственно. Вместе с тем, в верхней части разрезов станций присутствуют интервалы со значительно меньшей зрелостью ОБ. Это, вероятно, связано с неравномерным распределением миграционной составляющей и, следовательно, разным соотношением сингенетических и эпигенетических УВ соединений в осадках.

По соотношению регулярных стеранов C₂₇:C₂₈:C₂₉ все экстракты, в целом, схожи. Исходное ОБ для них имеет смешанный преимущественно сапропелевый генезис. При этом большая доля сапропелевой составляющей наблюдается в экстрактах горных пород (C₂₇/C₂₉ от 1,1 до 1,5), в то время как экстракты осадков отличаются большим вкладом гумусовой компоненты (C₂₇/C₂₉ от 0,8 до 1,2). Стоит отметить, что, чем выше степень зрелости ОБ для экстрактов осадков, тем большая доля сапропелевой составляющей наблюдается в нем.

Величины отношения адиантана к гопану (H₂₉/H₃₀ варьирует от 0,56 до 1) и отношения трициклических терпанов (t₂₄/t₂₃ варьирует от 0,43 до 0,85) свидетельствуют о преимущественно глинистом составе материнской для УВ соединений толще. Отношение диастеранов к регулярным состава C₂₇ также используется для определения литологического состава генерирующих УВ отложений. Очень низкие значения, характерные для ОБ карбонатных пород (диа/рег < 0,2), встречены лишь в единичных образцах осадков. Однако,

стоит учитывать, что данный параметр подвержен влиянию степени зрелости ОВ, особенно на начальных этапах его преобразования. Таким образом, низкие значения отношения диастеранов к регулярным в экстрактах осадков скорее связаны не с карбонатным составом генерирующих их отложений, а со слабой катагенетической преобразованностью ОВ. Данное предположение подтверждается пониженными значениями биомаркерных параметров зрелости для этих экстрактов.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, РНФ 23-27-00293.

Список литературы:

1. Ступакова А. В. Структура и нефтегазоносность Баренцево-Карского шельфа и прилегающих территорий //Геология нефти и газа. – 2011. – №. 6. – С. 99-115.
2. Мельников П.Н., Скворцов М.Б., Кравченко М.Н., Агаджанянц И.Г., Грушевская О.В., Уварова И.В. ГРП в Арктике ресурсный потенциал и перспективные направления //Деловой журнал Neftegaz. ru. – 2020. – №. 1. – С. 22-30.
3. Соколова М.Н., Абля Э.А. Исследование биомаркеров в органическом веществе донных отложений Северного и Среднего Каспия. – 2007.

УДК 550.8.053 +553.981(548.562) +550.8.012

Рубрика 38.53.3

ПЕРСПЕКТИВЫ ГАЗОГИДРАТОНОСНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

PROSPECTS OF GAS HYDRATES OCCURRENCE IN THE BARENTS SEA

Матвеева Татьяна Валерьевна¹, Щур Анастасия Андреевна¹, Чазов Артем Олегович^{1,2}

¹ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург

² СПбГУ, Санкт-Петербург

Matveeva Tatiana Valerievna¹, Shchur Anastasiia Andreevna¹, Chazov Artem Olegovich^{1,2}

¹ VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg

² SPbGU, Saint-Petersburg

Введение

Субмаринные газовые гидраты - льдоподобные образования - результат межмолекулярных Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий углеводородных газов и воды при пониженных температурах и/или повышенных давлениях. Условия для их образования в высоких широтах приурочены к относительно глубоководным (около 200 м и глубже) участкам шельфа и континентального склона (фильтрогенные гидраты) или, напротив, к мелководью, где сохранились реликты многолетнемерзлых пород, образованных в ходе субэраляного промерзания участков суши, подвергшихся впоследствии затоплению во время периодов потепления, сопровождавшихся трансгрессиями моря (криогенные гидраты). Баренцево море - одна из акваторий, где глубины и пониженная температура воды у дна создают предпосылки для образования и сохранения гидратов углеводородных газов обоих типов в определенном интервале осадочного разреза, который называют Зона Стабильности Газовых Гидратов (ЗСГГ). Выше или ниже этой зоны твердые гидраты существовать не могут.

Целью работы являлся количественная ресурсная оценка метана фильтрогенных газовых гидратов в недрах Баренцева моря с применением вероятностно-статистического метода на основе прогноза распространения ЗСГГ по океанологическим, геологическим и геотермическим данным и выявлении признаков миграции углеводородных газов в эту зону по сейсморазведочным данным.

Материалы и методы

Для реализации количественной оценки прогнозируемых ресурсов газовых гидратов вероятностно-статистическим методом были подготовлены "вводные" данные и расчетная сеть для последующей визуализации результатов количественной оценки. Вводные океанологические данные были представлены материалами по придонным температуре и солености (осредненные среднемесячные значения за период 1993-2016 гг. из [<https://resources.marine.copernicus.eu...>]) и глубине моря по модели GEBCO 2020 [https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/].

Кроме этого, в акватории Баренцева моря выполнен анализ и переинтерпретация цифровых материалов сейсморазведки МОВ ОГТ 2D (изучен 131 суммированный разрез в формате SEG-Y) протяжённостью 23983 пог.км по данным ОАО "Севморнефтегеофизика" 2009 г. и ОАО "МАГЭ" 2008-2010 и 2012-2014 гг. для выявления условий миграции углеводородов.

Параметры расчетной сети заданы следующим образом: разрешение 1/12 град. (или 0,083x0,083 град.), площадь ячейки - 12-33 кв.км; количество точек - 40405 (Рис. 1). Положение и наличие очагов разгрузки газа по сейсморазведочным данным расчетах учитывались путем задания определенных значений точкам сети, расположенным вблизи очагов разгрузки газа и вне таковых (см.рис. 1).

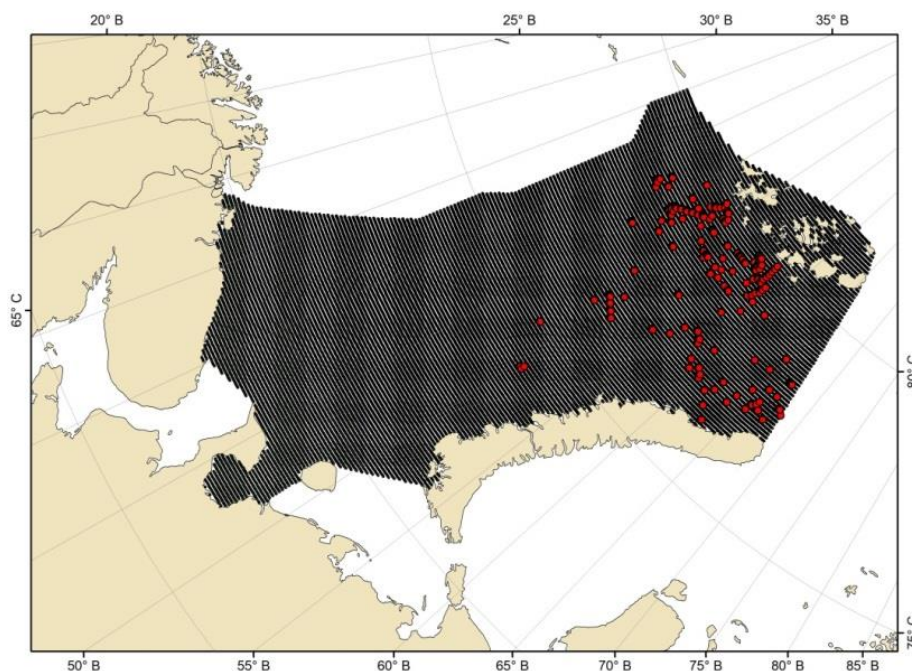


Рис. 1 Район работ в Баренцевом море с расчетной сетью (черные точки) и точками (красный цвет), расположенными в радиусе 0-2 км от очагов разгрузки газа.

Геотермические данные для расчетов ЗСГГ насчитывали 49 значений геотермического градиента, варьирующих в пределах 10-152 мК/м при среднем значении 50 мК/м. Общая мощность осадочного чехла для расчетной сетки определялась с помощью ПО ArcGIS 10.4 по [Поселов и др., 2012]. Мощность стратиграфических горизонтов принята пропорциональной продолжительности геологического периода. Гранулометрические показатели генерировались псевдослучайным образом по распределению функции плотности вероятности на основании литологических данных по 12 скважинам. Общий органический углерод (Сорг) для расчета функции плотности вероятности задавался на основе измерений в различных горизонтах 15 скважин, по которым имеются данные подобных измерений. В качестве компонентного состава гидратообразующего газа принят 100% метан; глубина зоны сульфат-редукции не учитывалась.

Количественная оценка прогнозируемых ресурсов газовых гидратов вероятностно-статистическим методом производилась посредством специализированного ПО (разработка «ВНИИОкеангеология для каждой ячейки географической сети (см. рис. 1), а также выполнялась интегральная ресурсная оценка, представляющая собой сумму ресурсных оценок для всех ячеек расчетного участка. Данное ПО, кроме собственно количественной ресурсной оценки методом Монте-Карло, обеспечивает интегрированные расчеты ЗСГГ в пределах расчетного участка на основе указанных океанологических, геотермических данных,

учет геологических факторов (мощность осадочного чехла) и равновесные параметры газогидратообразователя при заданных РТ условиях (в нашем случае это был чистый метан) и солёности морской воды. Оценка прогнозируемых ресурсов метана газовых гидратов производилась с вероятностью 5%, 50% и 95% - т.е. получены значения количества метана, которые были превышены для 50, 500, 950 расчетов из 1000 по методу Монте-Карло, соответственно.

Результаты

В ходе переинтерпретации цифровых данных сейсморазведки выявлено 277 аномалий, связанных с разгрузкой газа, включая 140 аномалий типа «газовая труба»; 44 очага разгрузки газа по амплитудно-скоростным аномалиям и 93 покмарка (Рис. 2). Эти данные, свидетельствующие о восходящей миграции углеводородов в сторону морского дна, т.е. в ЗСПГ, использовались для оценок прогнозируемого количества метана, которое может находиться в недрах Баренцева моря в гидратном состоянии.

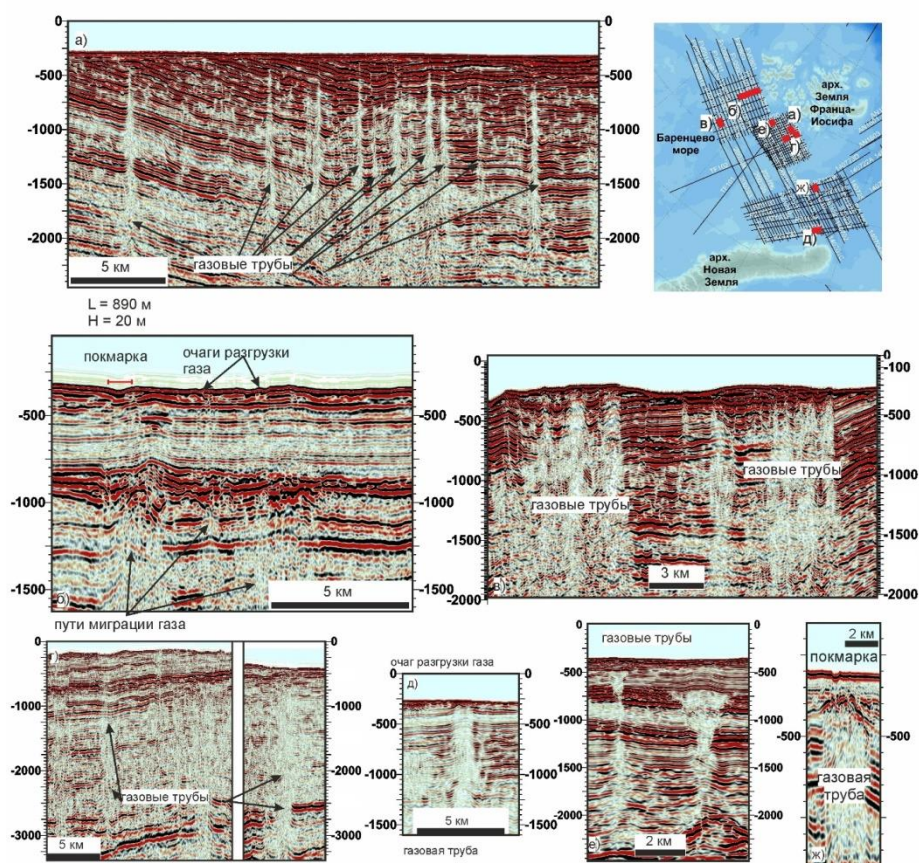


Рис. 2 Примеры газообусловленных аномалий, маркирующих очаги разгрузки углеводородов на сейсмических разрезах в Баренцевом море. Положение фрагментов профилей (е-ж) отмечено на карте красными отрезками.

По результатам количественной оценки вероятностно-статистическим методом (Монте-Карло) прогнозируемое количество метана в газовых гидратах в районе исследований в Баренцевом море оценено величиной 293.6 трлн куб. м с вероятностью 5%, 7.7 трлн куб. м с вероятностью 50% и 0.016 трлн куб. м с вероятностью 95%.

На рисунке 3 представлено распределение плотностей прогнозируемых ресурсов (млрд куб. м/кв. м), закартированное с помощью расчетной сети с 50% вероятностью по методу Монте-Карло в акватории Баренцева моря. С вероятностью 50% значения плотности прогнозируемых ресурсов варьируют в пределах 0,01-0,1 млрд куб. м/кв. м.

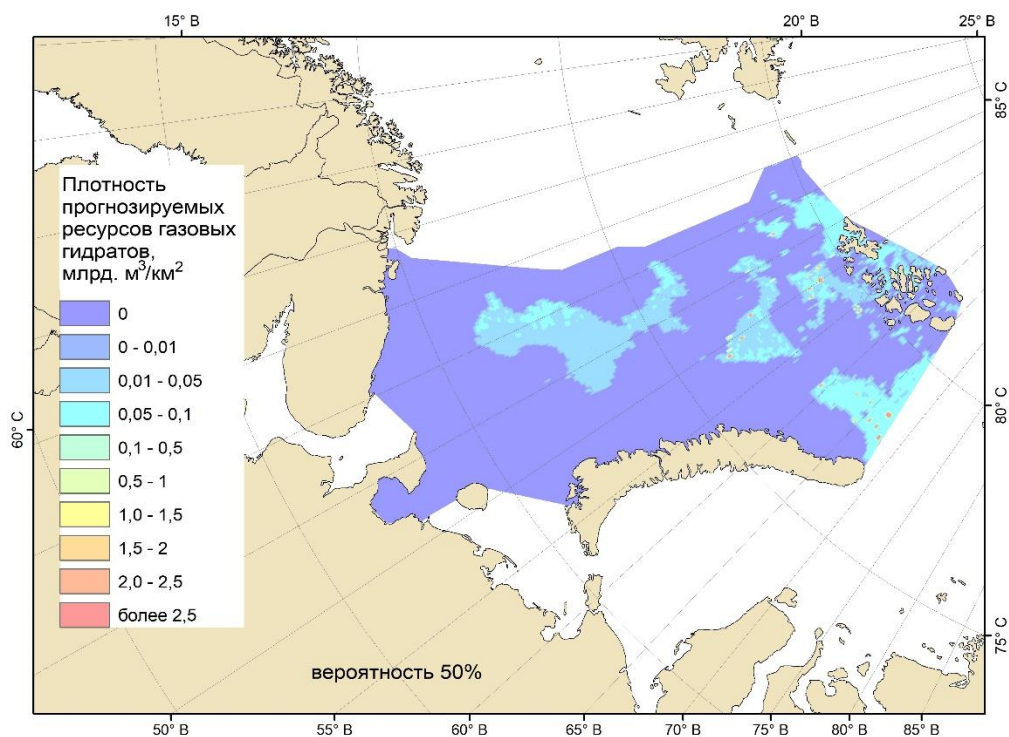


Рис. 3. Карта плотности прогнозируемых ресурсов гидратного метана в Баренцевом море, оцененных вероятностно-статистическим методом с вероятностью 50%.

Поля со значениями более нуля на рисунке 3 соответствуют распространению ЗСГГ фильтрационного генезиса. Как видно из рисунка 3, Баренцево море характеризуется весьма благоприятными для гидратообразования условиями, при которых ЗСГГ занимает около 25% площади акватории (в пределах ИЭЗ России). Выполненная прогностическая оценка перспектив газогидратоносности на основе комплекса геолого-геофизических и океанологических данных представляется наиболее обоснованной, ее уточнение возможно при повышении степени изученности акватории Баренцева моря в отношении гидратов.

Список литературы:

1. <https://resources.marine.copernicus.eu..>
2. https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/
3. Поселов В.А., Жолондз С.М., Трухалев А.И., Косько М.К., Поселова Л.Г., Буценко В.В., Павленкин А.Д., Верба В.В., Ким Б.И. Карта мощности осадочного чехла Северного Ледовитого океана // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб., ВНИИОкеангеология, 2012. (Тр. ВНИИОкеангеология. Т. 223. Вып. 8). С. 8-14.

ДК 551.435.62; 550.344.42

Рубрика 38.43.19

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ЛЕДНИКОВЫХ И ВНЕЛЕДНИКОВЫХ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ОКРАИНАХ АРКТИКИ

FEATURES OF THE SEDIMENTARY MATTER TRANSPORT ON THE GLACIAL AND NON-GLACIAL ARCTIC CONTINENTAL MARGINS

Друщиц Валентина Александровна

¹ ГИИ РАН, Москва

Drouchits Valentina Aleksandrovna

¹ GIN RAS, Moscow

Введение

Геологическое развитие континентальной окраины Арктики в позднем кайнозое обусловило распределение ледниковых и внеледниковых областей в квартере. Ледниковые континентальные окраины возникли в областях влияния срединно-океанических хребтов, а внеледниковые — на площади плит Лаптевоморской и Арктическая Аляска-Чукотка. Для этих регионов в течение четвертичного периода была характерна цикличность смены природных обстановок. Для ледниковых континентальных окраин (ЛКО) основная тенденция в развитии определялась ледниковыми и межледниковыми эпохами, а для внеледниковых континентальных окраин (ВКО) — трансгрессивно-регрессивными циклами. Между ЛКО и ВКО существуют переходные области, в которых были нарушены обе тенденции (рис. 1). Континентальная окраина Западной Сибири и севера п-ова Таймыр (Карское море) была свободна от ледникового покрова во время последнего ледникового максимума. Восточная часть моря Бофорта покрывалась ледником в начале четвертичного периода и в позднем неоплейстоцене [Duk-Rodkin et al., 2004]. Следует отметить, что основные черты рельефа ЛКО формировались вследствие рифтообразования в позднем кайнозое. Позднее, в квартере, рельефообразование находится под влиянием двух факторов: геодинамики и ледниковой деятельности. Мощность четвертичных отложений на шельфе не превышает 100-150 м, на континентальном склоне и подножии — в несколько раз выше. ВКО в позднем кайнозое становятся областями преобладающей аккумуляции. В регионе российской восточной Арктики этот процесс доминирует уже 20 млн лет, мощность четвертичных отложений на шельфе может превышать 500 м [Сейсмостратиграфия... , 2022].

В ЛКО происходит резкая смена режима осадконакопления, выдвижение края шельфа в сторону океана, накопление значительных масс четвертичных осадков в виде конусов выноса и оползней на континентальном склоне и его подножии. Для ВКО динамика перемещения обломочного материала обусловлена колебаниями уровня моря. В криохроны, при падении уровня моря, выдвижение дельт к краю шельфа приводило к смещению осадков в область континентального склона. На современном этапе все вышеперечисленные области находятся в моноклиматических условиях: переживают межледниковье, трансгрессию. Меняется система: мобилизация — транзит — аккумуляция осадочного материала.

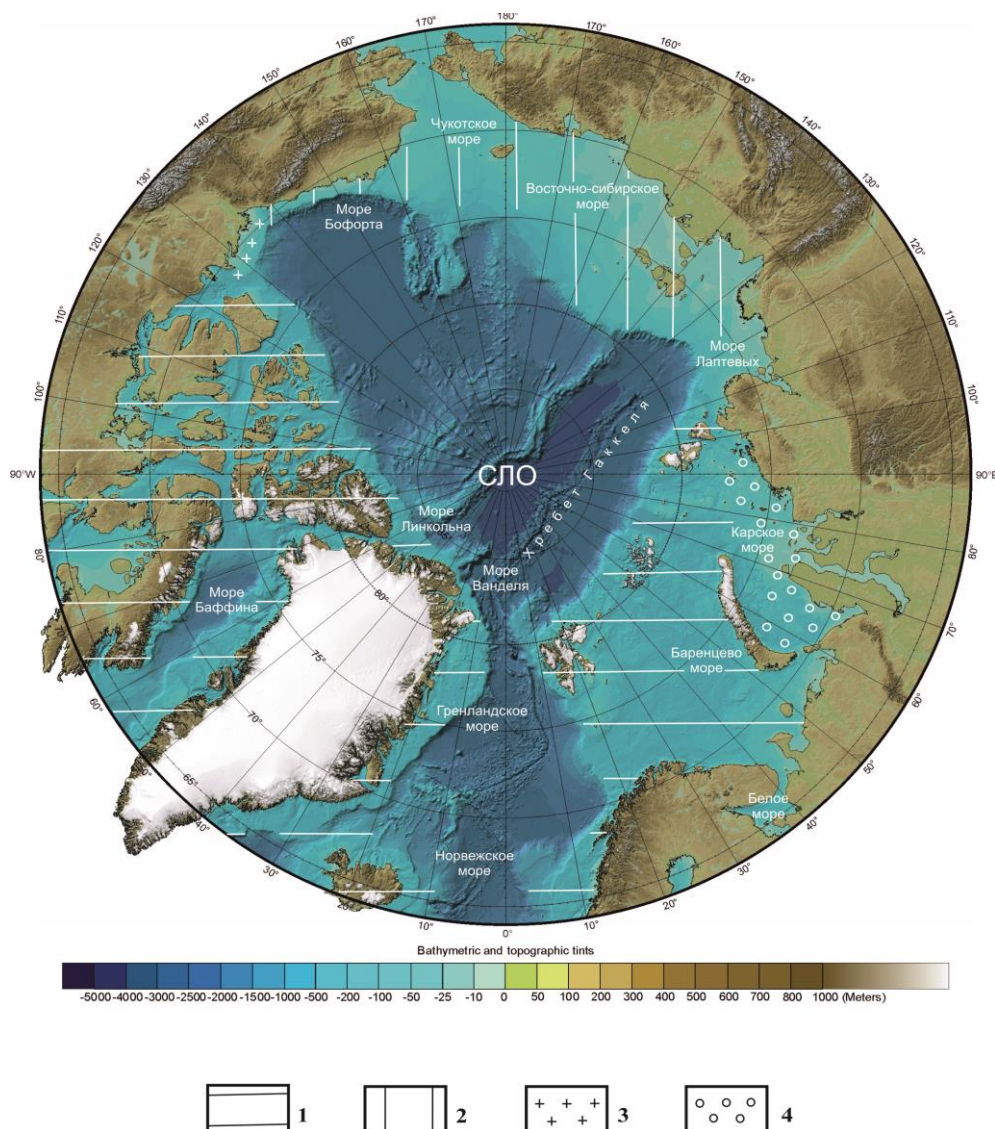


Рисунок 1. Распространение ледниковых и внеледниковых континентальных окраин в арктическом регионе [Друщиц, 2022 с изменениями].

1 — ледниковые континентальные окраины; 2 — внеледниковые континентальные окраины; 3-4 — переходные области между ледниковыми и внеледниковыми континентальными окраинами: 3 — континентальная окраина центральной части Северной Америки (восточная часть моря Бофорта); 4 — континентальная окраина Западной Сибири и севера п-ова Таймыр (Карское море). СЛО — Северный Ледовитый океан

Перемещение обломочного материала на ЛКО

Перераспределение осадочного материала на ЛКО находится под влиянием геодинамики и в термохроны, и в криохроны. Основными магистралями выноса обломочного материала к континентальному подножию и абиссальной равнине являются трогги, каналы, каньоны, подледниковые долины, которые заложились по тектоническим, флювиальным и литологическим нарушениям и в дальнейшем подверглись эрозии ледников и мутьевых потоков. Главное направление движения осадков от ледника к абиссальной равнине: линейное по отрицательным формам рельефа, массовое, площадное смещение осадков. Также происходит катастрофический, обвально-оползневой срыв огромного объема отложений, изменяющий рельеф континентального склона и континентального подножия.

Все эти возможные способы перемещения отложений испытывают влияние вертикальных, горизонтальных неотектонических нарушений и землетрясений. Не следует забывать, и в ледниковые, и в межледниковые стадии Северный ледовитый океан покрыт льдами. Наиболее хорошо изучен Гренладско-Норвежский бассейн, где существуют относительно благоприятные навигационные условия. Развитие поисковых работ на нефть и газ в этом регионе привело к накоплению большого материала геологии четвертичного периода.

Широкое распространение на континентальных окраинах Гренландии и Северо-Западной Европы получили системы фьорд - трог - конус выноса. Это пути выноса ледникового материала и мутьевых потоков. Мощности четвертичных осадков в конусах выноса этих систем достигают значительных размеров. Мощность конуса выноса залива Мелвилл (Западная Гренландия) составляет около 2000 м, он формировался 2,7 млн лет [Newton et al., 2020]. Установлено, что на востоке Гренландии ледник появился около 7,5 млн л.н. Общая мощность конуса выноса залива Скорсби (Восточная Гренландия) равна 850 м, четвертичная часть — 370 м [Butt et al., 2001]. Мощность конуса выноса системы Медвежьего острова (Trough mouth fan Bear Island) – 3500 м, а системы Сторфьерден — 4000 м. Первая система начала строиться 1,6 млн л. н., а вторая 1,5 млн л.н. [Bellwold et al., 2018]. Мощный шлейф континентального подножия фиксируется в южной части котловины Нансена [Соколов и др., 2021]. Конусы выноса сформированы в устьях желобов Франц Виктории, Св. Анны, Воронина.

В результате аккумуляции огромного объема ледникового материала на краю шельфа создаются условия для возникновения оползней. Такие явления происходят во время быстрого наступания ледника либо в его регрессивную фазу. Триггером для их спуска могут служить землетрясения [Баранов и др., 2018]. На континентальном подножии Северо-Западной Европы наблюдается чередование конусов выноса и оползней. Зафиксировано наличие оползневых тел в толще конусов выноса. Сторегга — наиболее известный четвертичный оползневой комплекс, расположен на континентальной окраине Норвегии. Он начал формироваться 1, 7 млн л.н. 8150 л. н. произошел последний оползень в этой системе. Скорость осадконакопления в районе становления оползня может достигать 0,6 м/год [Dimakis et al., 2000]. В районах смежных с оползнем Сторегга образовались несколько других оползневых тел в течение последних 500000 л. [Jing et al., 2022].

Особенностью рельефа ЛКО, сформированного в межледниковье, являются дюнообразные массивы, сложенные мелким песком и алевритом, обнаруженные на поверхности континентального склона и его подножии, а также в толще позднекайнозойского разреза отложений. На континентальном склоне, юго-запада Баренцева моря, на глубине 475-800 м находится поле песчаных волн, которое образовалось 11-13 тыс. л. н.[Vøe et al., 2015]. На северо-востоке Гренландии осадочные волны построены чередования мелкого песка и крупного алеврита и встречаются на глубинах 2000-2600 м. Происхождение полей с волнообразным рельефом, видимо, связано с активностью мутьевых потоков во время последнего ледникового максимума и последующей переработкой ледниковых турбидитов современной системой циркуляции водных масс [García et al, 2016].

По данным современных исследований [Perez et al., 2020], проведенных в центральной части Северного Ледовитого океана, установлено, что в нижней части континентального склона волнообразный рельеф, сложенный мелкозернистыми осадками, имеет широкое распространение. По размещению этих образований выделено три уровня: 1000-1500 м (Лаптевоморская континентальная окраина, желоб Белова, желоб Оден), 1500-2000 м (желоб Оден, долина Гордиенко) и 2500-3000 м (долина Гордиенко). Длина волн изменяется от 2 до 12 км, а высота от 4 до 40 м. Предполагается, что дюнообразный рельеф на континентальном склоне создается вследствие взаимодействия мутьевых потоков, вдольсклоновых (контурных течений) и внутренних волн.

В процессе перемещения от шельфа к абиссали огромного количества обломочного материала на большие расстояния создаются возможности для формирования массивов с хорошими коллекторскими свойствами. К настоящему времени известны два четвертичных газовых месторождения: Эвиат и Пион в Северном море. Это не арктический бассейн, но открытие этих месторождений на ЛКО свидетельствует о том, существуют предпосылки образования четвертичных газовых месторождений в обрамлении Северного Ледовитого океана. В Таблице представлены данные по этим месторождениям.

Таблица. Характеристики четвертичных газовых месторождений [Bellwald et al., 2022; Rose et al., 2016]

Газовая залежь	Локация	Возраст (млн л.), глубина залегания коллектора (м)	Мощность (м) и литология коллектора	Генезис осадков коллектора	Генезис осадков покрывки
Эвиат	Центральная часть Северного моря на 81 м	≤ 1,78, 400	2-9, мелкий песок, алевроит, с 5-30 % глины	.Конус выноса ледника в стадии отступления	Ледниково-морской
Пион	Норвежский желоб на 387 м	0,4-0,2, 548	30, песок	Конус выноса ледника в стадии отступления	Ледниково-морской

Газ этих месторождений на 99% состоит из метана. Поверхность морского дна нарушена бороздами айсбергового выпаживания. В 80 м над месторождением Пион обнаружено скопление природного газа, который выходит в водную толщу, формируя сеть покмарков на дне.

Перемещение обломочного материала на ВКО

На ВКО находятся моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и западная часть моря Бофорта. В позднем кайнозое, при общей тенденции к опусканию, формируется осадочный чехол, представленный чередованием морских и аллювиально-озерных и эоловых отложений. На сейсмических разрезах в отложениях выделяется обычно плиоцен - четвертичная толща, сформированная после позднемиоценого падения уровня океана мощность которой в морях российских восточно-арктических морях превышает 1 км [Ким и др., 2016]. На шельфе западной части моря Бофорта мощность четвертичных осадков ≤ 100м. В криохроны, когда уровень моря падает, речные долины и каньонообразные долины тектонического происхождения (каньон Геральд, каньон Барроу) достигают края шельфа. Происходит вынос терригенного материала непосредственно в верхнюю часть

континентального склона. Для ВКО характерно наличие каньонов, по которым мутьевые потоки доставляют наносы к континентальному подножию. Мощности оползневых отложений на континентальном склоне западной части моря Бофорта 200-400 м [Баранов и др., 2018]. Учитывая значительный вынос реками обломочного материала на шельф моря Лаптевых распространение в этой области сильных землетрясений, можно ожидать наличие множества оползневых тел на континентальном склоне и подножии. Предполагается [Lehmann, Jokat, 2022], что, от моря Лаптевы до западной части моря Бофорта, встречаются ледниковые осадки. Для западной части Чукотского поднятия определена мощность ледниковых образований (максимум 450 м) и величина наращивания осадочного чехла в сторону океана (6 км). В бассейне Нортвинд возможная мощность гляциальных отложений изменяется от 250 до 360 м. Происхождение этих отложений может объясняться активностью нескольких процессов: развитием локальных центров оледенения в Восточно-Сибирском море, миграцией выводных ледников Канадского Арктического архипелага и Лаврентийского ледникового массива. Рассматривается также возможность влияния шельфовых ледников и перемещения морского льда. В трансгрессивную фазу происходит заполнение подводных палеодолин. Распределение осадочного материала зависит от системы циркуляции прибрежных и океанических течений. Главные источники наносов — речной сток и эрозия берегов. Основная масса наносов остается в дельтах и береговой зоне. К континентальному склону поступает пелитово-глинистый материал. Крупнозернистые обломки перемещаются морскими льдами, которые продолжают существовать и в термохроны. Большое влияние, несомненно, оказывает, течение, приходящее из Берингова пролива. В море Лаптевых начале среднего голоцена интенсивность седиментации достигала 3 мм/год, затем уменьшились до 0,14 мм/год. Скорость осадконакопления на шельфе и континентальном склоне Чукотского моря составляет около 0,01 мм/год [Wegner et al., 2015]. На западном склоне Чукотского поднятия, на глубине 1200-1800 м, находится поле седиментационных волн, состоящих из опесчаненных илов. Массив начал формироваться в среднем неоплейстоцене вследствие активности контурных течений [Hua et al., 2022].

Перемещение обломочного материала на континентальных окраинах переходного типа

Как указывалось выше, к таким окраинам относятся континентальная окраина Западной Сибири и севера п-ова Таймыр (Карское море) и восточный регион моря Бофорта. Отличие континентальной окраины, на которой расположено Карское море, заключается в том, что эта область в четвертичном периоде развивалась в системе циклических климатических изменений (ледниковье-межледниковье), а во время последнего ледникового максимума находилась тыловой зоне Новоземельского ледника. Ледниковый покров отсутствовал. Рельеф и осадочный чехол сохранили черты формирования в ледниковых условиях, измененных развитием во внеледниковой обстановке. Карском море мощности плиоцен - четвертичных осадков составляют 50-250 м максимальная величина (≥ 250 м) зафиксирована в устьевой области Оби. Большая часть рельефа сформирована процессами неволновой аккумуляции. Распространены подводные долины, где, видимо, в этапы стабилизации уровня моря образовывались дельты и конусы выноса. Встречаются выходы коренных пород. Современные и голоценовые осадки представлены, главным образом, алевритовыми пелитами, в береговой зоне и на возвышенностях — пелитовыми и песчаными алевритами [Мирошников и др., 2021]. В рельефе и осадочной толще шельфа наблюдаются следы ледниковой эрозии. Остров Новая Земля и архипелаг Северная Земля генерируют айсберги. На бортах отрицательных форм рельефа фиксируются несколько стадий оползания осадков. Вынос наносов осуществляется по желобам Св. Анны и Воронина. Обнаружены мощные тела (30 м) флювиогляциальных отложений [Бирюк и др., 2022]. Такие тела могут стать потенциальными газовыми коллекторами. Суровые природные условия последней регрессии

привели к формированию ММП, которые в настоящий момент имеют островное распространение на шельфе. На суше сохранился массив реликтовых криогенных гидратов природного газа, что является результатом особенностей развития этой континентальной окраины в квартере.

Континентальная окраина смежная с дельтой реки Маккензи была захвачена Лаврентийским ледником в начале и в конце четвертичного периода, а на протяжении всего квартера находилась во фронтальной зоне ледового массива. Этим и объясняется формирование мощного осадочного чехла и в дельте, и на прилегающем шельфе, где основным источником наносов является река Маккензи. Мощность плиоцен-четвертичных осадков на шельфе 2-4 км [Paul et al., 2022]. С одной стороны в криохроны происходит выдвигание дельты к краю шельфа и вынос аллювия на континентальный склон, с другой стороны в термохроны флювиогляциальный материал от Лаврентийского ледника лавинообразно накатывается на шельф и мутьевыми потоками перемещается по склону. И в ледниковые и межледниковые стадии формируются оползни на континентальном склоне и материковом подножии. Еще одной особенностью этой континентальной окраины, возникшей в результате близости к Лаврентийскому ледниковому покрову, является мощная толща (700 м) многолетнемерзлых пород (ММП) на шельфе. В послеледниковые интенсивность седиментации достигала 6 мм/год. В современный период скорость осадконакопления равна 1,4 мм/год [Wegner et al., 2015]. В настоящий момент времени ММП на краю шельфа начали интенсивно деградировать, превращая эту область в зону денудации [Paull et al., 2022]. Бровка шельфа выделяется и по отсутствию голоценовых осадков, и по следам ледникового выпахивания. На континентальном склоне, на глубинах 220-800 м, в разрезе осадочного покрова, на расстоянии 40-390 м от поверхности дна, зафиксировано три эрозионных уровня, видимо, выработанных шельфовым ледником либо льдом, принесенным от Канадского Арктического архипелага [Riedel et al., 2021].

Заключение

Результаты современных исследований континентальных окраин Арктики и смежных областей позволяют определить различия в системе мобилизация — транзит — аккумуляция обломочного от береговой зоны и шельфа к подножию континентального склона и абиссальной равнины. Для ЛКО характерна высокая динамическая активность, определяемая энергией основного генератора процесса перемещения обломочного материала — ледникового массива. В результате в ледниковые эпохи сформировались конусы выноса и оползни огромной мощности. В термохроны продолжается схождение оползней, а также возрастает влияние течений. На ВКО действует аналогичная система движения наносов от континента к абиссали, но энергия ее гораздо меньше, и главный агент смещения обломков — флювиальные процессы. Мощность четвертичных осадков на шельфах ВКО больше, а на склонах и подножии меньше по сравнению ЛКО. На склонах и ЛКО, и ВКО контурными течениями создаются седиментационные волны. В исследованиях последних лет большое внимание уделяется циркуляции морского льда, развитию шельфовых и выводных ледников, эрозионной и седиментационной деятельности айсбергов. Для решения вопроса о существовании ледника на северо-востоке Евразии и наличии гляциального материала на ВКО необходимы более детальные исследования.

Финансирование

Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательских работ ГИН РАН: «Фундаментальные проблемы тектонических, литогенетических процессов формирования складчатых структур Северо-Востока Азии» (тема FMMG-2023-0010).

Список литературы:

1. Баранов Б.В., Дозорова К.А., Рашидов В.А., Рукавишникова Д.Д. Подводные оползни континентальных окраин Арктического бассейна // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. — 2018.— № 4. — Вып. 40. — С. 51-68.
2. Бирюк М. А., Рыбалко А. Е., Токарев М.Ю., Пирогова А.С. Геологическое строение верхней части разреза Центрально-Карского желоба (по результатам полевых работ ТТР — 21 в северной части Карского моря на НИС «Академик Борис Петров») // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России.— 2022. — Выпуск 9. — С. 29-32.
3. Друщиц В.А. Корреляция событий квартера на Арктической континентальной окраине // Бюлл. Комис. по изуч. четв. периода. М.: ГЕОС.— 2022. — № 80. — С. 68-90.
4. Ким Б.И., Евдокимова Н.К., Харитонов Л.Я. Фундамент и осадочный чехол Восточно-Арктического шельфа России // Геология нефти и газа. 2016. № 3. С.14-27.
5. Мирошников А. Ю., Бадюков Д.Д., Флинт М. В, Репкина Т.Ю. и др. Рельеф дна Карского моря и сорбционные свойства осадков как факторы аккумуляции загрязнений // Океанология. — 2021. — Том 61. — № 5. — С. 809–821
6. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов / Никишин А.М. и др.; Отв. ред. Н.Б. Кузнецов. — Москва: ГИН РАН. Вып.632. — 2022. — 156 с.
7. Соколов С. Ю., Мороз Е. А. , Чамов Н. П., Патина И. Н. . Палеоген-четвертичная полифациальная осадочная система южного обрамления котловины Нансена // Литология и полезные ископаемые. — 2021. — № 5. — С. 389–405.
8. Bellwald B., Planke S., Vadakkepuliymbatta S. et al. Quaternary and Neogene Reservoirs of the Norwegian Continental Shelf and the Faroe- Shetland Basin // First Break. — 2022. — Vol. 40. No 6. — P. 43-54. DOI: 10.3997/1365-2397.fb2022045.
9. Butt F. A., Elverhøi A., Forsberg C. F. et al. Evolution of the Scoresby Sund Fan, central East Greenland- evidence from ODP Site 987 // Norsk Geologisk Tidsskrift. — Trondheim 200 1. — Vol.81. — P.3-15.
10. Dimakis P., Elverhøi A., Høeg K. et al., Submarine mass movements on glaciated and non-glaciated European continental margins: a review of triggering mechanisms and preconditions to failure // Marine and Petroleum Geology.— 2000.— Vol. 26. — P. 618–632.
11. Duk-Rodkin A., Barendregt R.W., Froese G.D. et al. Timing and extent of Plio-Pleistocene glaciations in north-western Canada and east-central Alaska // Quaternary Glaciations—Extent and Chronology. Ehlers J., Gibbard P.L. (Eds.), Part II. Elsevier North America, Amsterdam. — 2004.— P. 313–345.
12. Garcia M., Batchelor C. L., Dowdeswell J. A. et al., A glacier-influenced turbidite system and associated landform assemblage in the Greenland Basin and adjacent continental slope // Atlas of Submarine Glacial Landforms: Modern, Quaternary and Ancient. Geological Society, London, Memoirs. — 2016. — Vol. 46. — P. 461-468.
13. Hua Q., Li G., Zhou Q. et al. Sediment Waves on the Western Slope of the Chukchi Rise (Arctic Ocean) and Their Implications for the Paleoenvironment. J. Mar. Sci. Eng.— 2022. — 10, 1586. [https://doi.org/10, 1586](https://doi.org/10.1586).

14. . Jing S., Alves T., Omosanya K. O. Styles of slope instability on a Quaternary sub-arctic continental margin: The northwest flank of t h e Storegga Slide // Marine Geology. — 2022.— Vol. 454. 106933. 10.1016/j.margeo.2022.106933 file.
15. Lehmann C., Jokat W. Seismic constraints for ice sheets along the northern margin of Beringia // Global and Planetary Change. 2022. V. 215. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103885>
16. Newton A. M. W., Huuse M., Knutz P.C. et al. Repeated ice streaming on the northwest Greenland continental shelf since the onset of the Middle Pleistocene Transition // The Cryosphere. — 2020. — Vol. 14.— P. 2303–2312.
17. Paull C. K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. — 2022. — Vol. 119. — No.12. e2119105119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>.
18. Pérez L.F., Jakobsson M., Funck Th. et al. Late Quaternary sedimentary processes in the central Arctic Ocean inferred from geophysical mapping // Geomorphology. — 2020. — Vol. 369. — P. 1-15. 107309.
19. Riedel M., Dallimore S., | Wamsteeker M. et al. Mega-scale glacial lineations formed by ice shelf grounding in the Canadian Beaufort Sea during multiple glaciations // Earth Surf. Process. Landforms. — 2021.— Vol.46. — P. 1568–1585.
20. .Rose PH., Byerley G., Vaughan O. et al. Aviat: a Lower Pleistocene shallow gas hazard developed as a fuel gas supply for the Forties Field // Petroleum Geology of NW Europe: 50 Years of Learning – Proceedings of the 8th Petroleum Geology Conference. — 2016. <http://doi.org/10.1144/PGC8.16>, updated version.
21. Wegner C., Bennett K.E., Vernal A. et al. Variability in transport of terrigenous material on the shelves and the deep Arctic Ocean during the Holocene // Polar Research.— 2015. — Vol. 34. — 24964. <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v34.24964>.

УДК 552.12; 551.43

Рубрика 38.15.00

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ

LITHOLOGICAL FEATURES OF THE BOTTOM SEDIMENTS IN THE SOUTH-WESTERN KARA SEA

Сухих Елена Александровна¹, Ананьев Роман Александрович², Мороз Евгений Андреевич¹

¹ *Геологический институт РАН, Москва*

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

Sukhikh Elena Alexandrovna¹, Ananiev Roman Alexandrovich², Moroz Evgeny Andreevich¹

¹ *Geological Institute RAS, Moscow*

² *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow*

Введение

Четвертичный осадочный чехол юго-западной части Карского моря формировался в условиях чередований ледниковых и межледниковых обстановок, а также трансгрессивно-регрессивных циклов. По результатам акустической съемки рельефа дна и осадочного чехла выделяются районы с выраженным действием различных рельефообразующих факторов: флювиального, флювиогляциального, гляциального, криогенного, флюидогенного, тектонического [Гайнанов и др., 2005; Рекант, Васильев, 2011; Кохан и др., 2023]. Эпохи регрессии выделяются на акустической записи в форме эрозионных границ несогласия в осадочном разрезе, маркирующихся палеоврезами речных долин и каналов [Мусатов, 1998]. Также палеодолины выражены в современном рельефе дна [Ласточкин, 1977]. Вопросы о происхождении эрозионных врезов (флювиогляциальное или флювиальное), так же как и о положении границы последнего оледенения на шельфе Карского моря остаются дискуссионными [Павлидис, 1997; Patton et al., 2017]. На Приямальском шельфе распространены субаквальные многолетнемерзлые породы, поэтому в ряде районов процессы, связанные с их деградацией, могут приобретать роль рельефообразующих [Serov et al., 2015].

При изучении неконсолидированных отложений, образованных в морских, ледниковых и перигляциальных условиях, в зарубежных исследованиях с успехом применяется микроморфологический анализ, предметом которого является взаимное расположения составных частей осадочной массы, к которым относятся тонкодисперсное вещество, обломочный материал алевритовой, песчаной и гравийно-галечной размерности, поровые и трещинные пространства, а также новообразования [van der Meer, Menzies, 2011]. Данный подход вполне близок структурно-текстурному анализу, более распространенному в отечественных работах. С учетом имеющейся базы микроморфологических проявлений различных условий осадконакопления [Linch et al., 2012], в данном исследовании выполнена попытка проследить проявления различных рельефообразующих факторов, в том числе

ледниковой нагрузки, в микротекстурных и микроструктурных особенностях исследуемых осадочных образцов.

Данные и методика

В работе использовались материалы пробоотбора ударной грунтовой трубкой в 41 и 49 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» и в 51 рейсе НИС «Академик Борис Петров» в юго-западной части Карского моря (рис. 1). Микроскопическое исследование структурно-текстурных особенностей в ненарушенных осадочных последовательностях выполнялось в петрографических шлифах. Изучение минерального состава отдельных гранулометрических фракций проводилось под бинокуляром. Анализ химического состава отдельных минеральных зерен и прозрачно-полированных шлифов осуществлялся на сканирующем электронном микроскопе TESCAN (аналитик Горькова Н.В., ГИН РАН).

Для анализа возможного проявления рельефообразующих факторов в литологических особенностях (гранулометрическом, минеральном составе, текстурных и микротекстурных признаках) исследуемых осадочных колонок использовались материалы акустической съемки, по результатам которой выбиралось местоположение точек пробоотбора. В рейсах НИС «Академик Николай Страхов» акустическая съемка проводилась с помощью гидроакустического комплекса, в состав которого входили мелководный и глубоководный многолучевые эхолоты RESON SeaBat 8111 (частота излучаемого сигнала 100 кГц) и 7150 (частота излучаемого сигнала 12.5 кГц) и акустический профилограф EdgeTech 3300 (диапазон частотно-модулированных сигналов 2–12 кГц). В рейсе НИС «Академик Борис Петров» гидроакустический комплекс был представлен многолучевым эхолотом SeaBat T50-ER с частотой сигнала 200 кГц и профилографом Parasound P70, который позволяет получать данные в двух режимах: низкочастотном (0.5–7 кГц) и высокочастотном (18–24 кГц).

Съемка методом непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) с частотой спектра излучаемого сигнала 300–400 Гц проводилась на аппаратуре «Геонт-шельф». В качестве излучателя и приемника использовались спаркер ($W=600$ Дж) и одноканальная сейсмокося (длина 25 м).

Результаты

По данным многолучевого эхолотирования и сеймопрофилирования в восточной части района исследований характерными формами рельефа являются палеодолины. В акустическом разрезе донных осадков выделяются палеоврезы нескольких генераций. На сейсмограммах наблюдаются формы газовых каналов, приуроченные к бортам долин, иногда с проявлением дегазации в водной толще, а также акустические аномалии типа «яркое пятно». Присутствуют участки с характерным для мерзлых отложений резким ослаблением акустического сигнала и осветлением сейсмосаписи, при этом внутри осветленных участков рефлекторы легко прослеживаются. В западной, Приновоземельской, части в качестве рельефообразующих отмечаются ледниковый, водно-ледниковый и криогенный факторы. С учетом данных акустической съемки рассматриваемые колонки были условно разделены на западные и восточные.

Осадки верхнего литостратиграфического комплекса (ЛСК-I) представлены довольно однородными алеврито-глинистыми или глинисто-алевритовыми оливково-серыми илами. Их мощность, состав, количество песчаной и гравийно-галечной примеси определяется удаленностью от берега, глубиной моря и рельефом дна, что соответствует морскому седиментогенезу в условиях последней голоценовой трансгрессии.

Ниже однородных неслоистых илов ЛСК-I наблюдается изменение гранулометрического состава и текстур осадка.

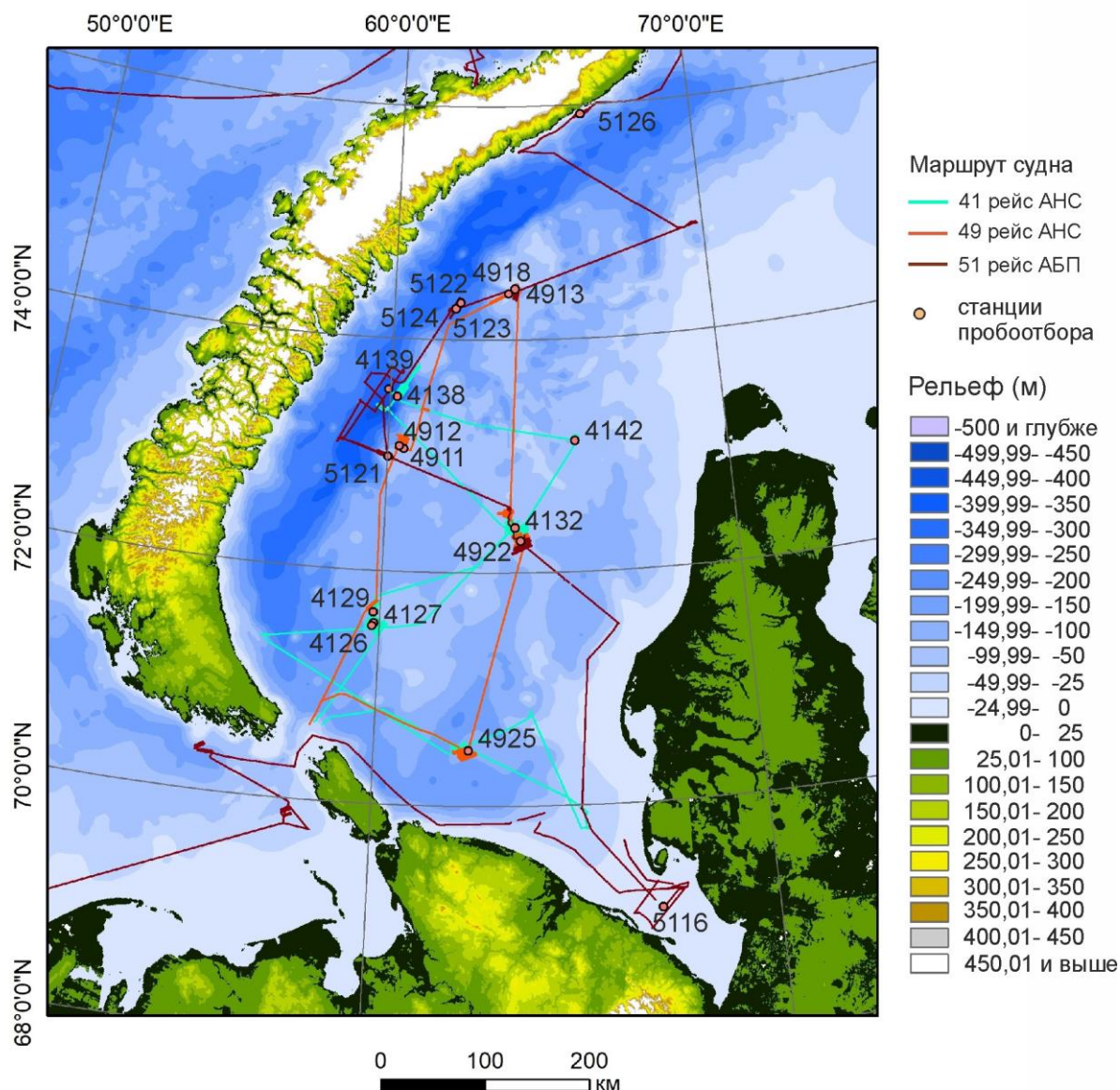


Рис. 1: Маршрут рейсов НИС «Академик Николай Страхов» (АНС) и «Академик Борис Петров» (АБП) и положение станций пробоотбора на полигонах исследований в юго-западной части Карского моря.

В восточных колонках встречаются слоистые текстуры. Гранулометрически обусловленная слоистость наблюдается в северо-восточной колонке 4142, (переслаивание песчаного и глинисто-алевритового материала в диапазоне 128–201 см). Также в рассматриваемых восточных колонках имеет место явление «псевдослоистости», когда послойное окрашивание гранулометрически однородного осадка органическим веществом (ОВ) приводит к изменению не только цвета, но и влажности внутри окрашенного слоя, что и формирует визуальный эффект наличия слоистости при единообразии гранулометрического состава (рис. 2). В западных колонках подобные текстуры не обнаружены.

Кроме того, в восточных колонках при макроописании наблюдались горизонты с флюидальными текстурами, выраженными в цвете донного осадка. В петрографических

шлифах, отобранных из соответствующих интервалов, были выявлены характерные рыжевато-коричневые глинистые прослои, которые чередуются с песчано-алевритовым осадком, состоящим в основном из зерен кварца различной степени окатанности. Внутри прослоев присутствуют системы трещин, иногда с темноцветным окрашиванием околотрещинных оторочек, вызванным повышенными концентрациями ОВ в этих участках, а также скопления темноцветных прожилок (вермикулярные структуры). По данным сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) в шлифе участков вещества с рыжим оттенком, концентрации атомарного углерода в нем довольно близки и находятся в диапазоне 16–22%, несколько возрастают в пределах вермикулярных структур.

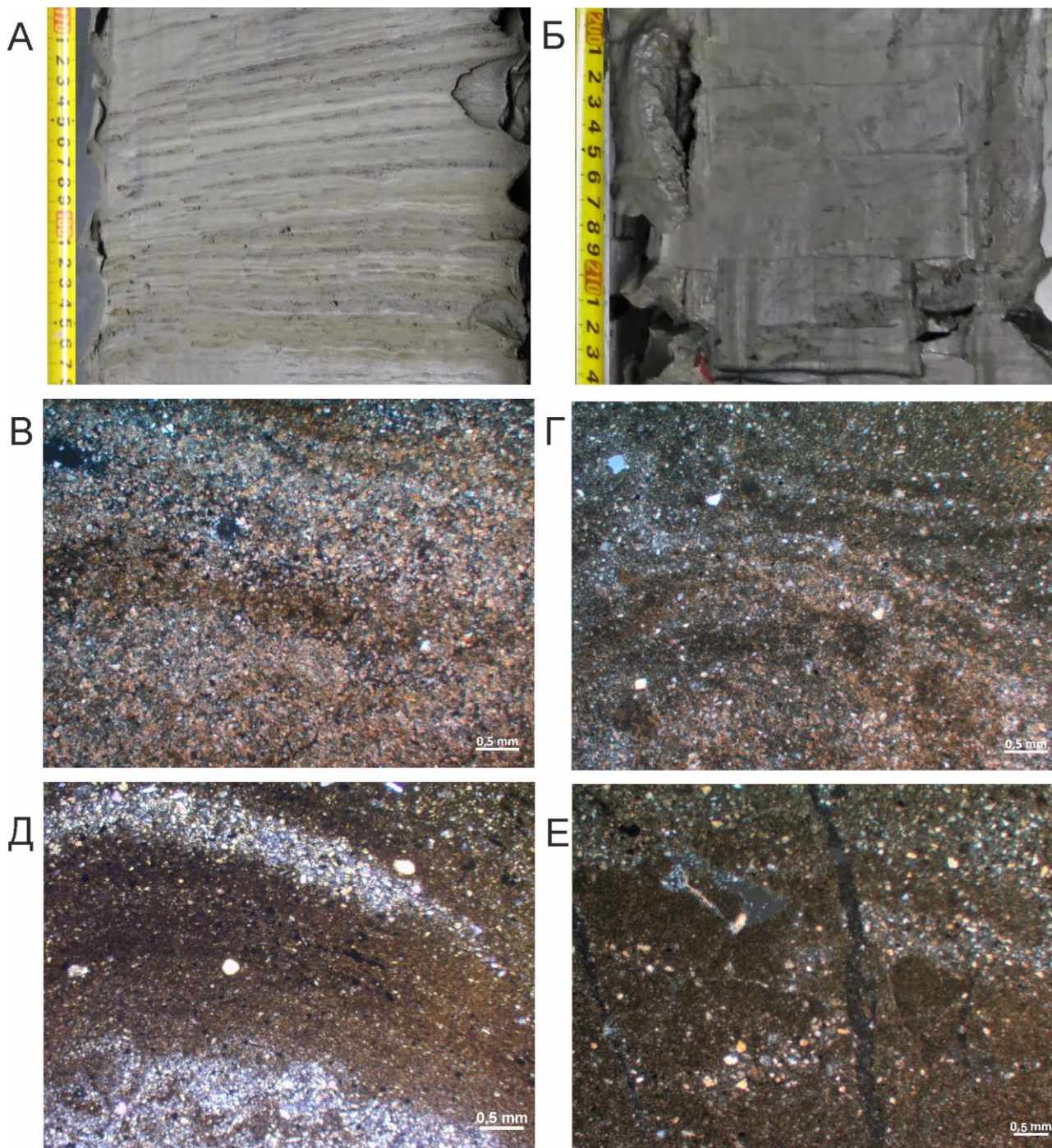


Рис.2: Слоистая текстура в колонках 4922 (170–188 см) – А и 4925 (200–214 см) – Б; проявление эффекта псевдослоистости в микротекстуре в образцах 4922_183 см – В, 4925_203 см – Г, 5116_75 см – Д (фрагмент микроскладчатой структуры, окрашенной тонкодисперсным органическим веществом, в прибортовой части ледово-экзарационной борозды); 4142_268 см – Е.

В ряде западных колонок (5121, 5122, 5123) в отложениях ниже слоя однородных илов ЛСК-I наблюдается резкое увеличение содержания материала алевритовой и песчаной размерности, а также количества грубообломочного материала. Это может являться индикатором субгляциальной (подледниковой) обстановки осадконакопления в данном интервале. Кроме гранулометрического состава, характерного для ледниковых тиллов, в некоторых образцах западных колонок присутствуют следующие индикаторы ледниковых нагрузок: ротационные структуры или турбаты, структуры типа «галло», раздавленные минеральные агрегаты и зерна, микроштриховка (рис. 3). Явление микроштриховки обнаружено в образцах глинистого и алеврито-глинистого состава.

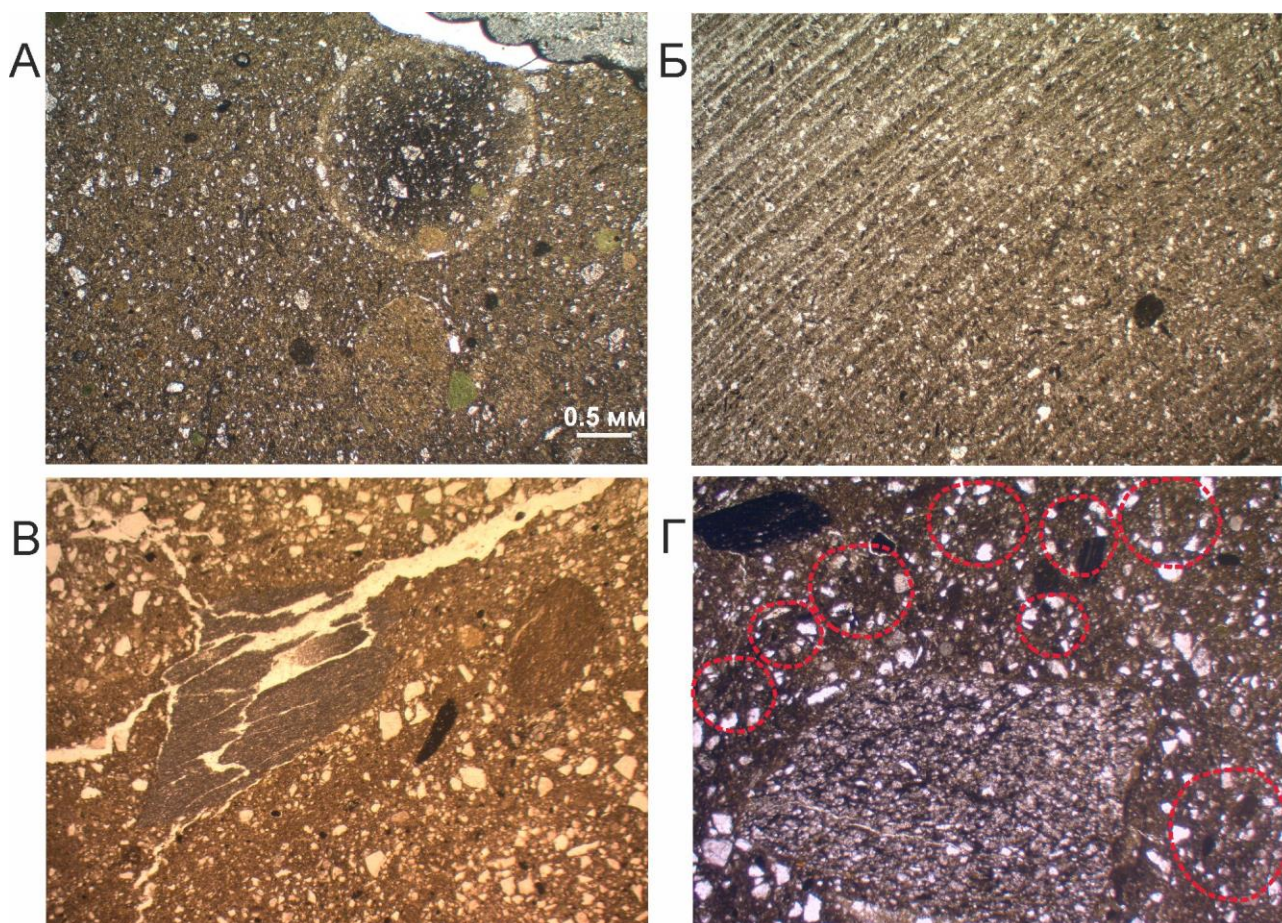


Рис.3: Микроструктурные и микротекстурные проявления ледниковой нагрузки в петрографических шлифах осадков приновоземельских полигонов исследования. Петрографические шлифы, проходящий свет без анализатора: А – структура типа «галло» (образец 5123_245 см); Б – микроштриховка (образец 5126_86 см); В – раздавленный минеральный агрегат (образец 5121_115 см); Г – ротационные структуры обозначены красным пунктиром (образец 5121_92 см).

В некоторых горизонтах западных колонок (4139, 4912) на микротекстурном уровне выражены ориентированные «потoki», образованные обломочным материалом алевритовой,

песчаной и гравийной размерности, в которые также включены зоны, состоящие из глинистого вещества. Подобные структурно-текстурные особенности указывают на подвижность осадочных слоев и, возможно, маркируют перигляциальную обстановку осадконакопления.

Иногда, как в западных, так и в восточных осадочных последовательностях переход от относительно однородных осадков к нижележащему горизонту с описанными структурно-текстурными особенностями маркируется ярко выраженной литологической границей. Осадочный материал на границе отличается от прилежащих слоев незначительным ростом содержания песчаной и алевритовой фракций, комковатой текстурой, пониженной влажностью и выраженными оттенками зеленовато-оливкового цвета. Ранее аналогичные границы уже были описаны для района исследований и обозначены как «сухие глины» или «хардграунды» [Левитан и др. 1994]. В рейсах НИС «Академик Николай Страхов» в юго-западной части Карского моря хардграунды были вскрыты на пяти станциях пробоотбора [Сухих, 2022].

В минеральном составе песчаной и алевритовой фракций осадка всех исследованных образцов преобладает кварц. Количество полевошпатового материала возрастает в западных колонках. Среди аутигенных минералов в осадочных отложениях юго-западной части Карского моря широко распространен гидротроилит ($\text{FeS} \cdot \text{H}_2\text{O}$). Распределение гидротроилита по разрезу неравномерно, от мелких единичных примазок, либо полного отсутствия, до крупных пятен и прослоев. Также определены Fe-Mn стяжения, вивианит ($\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), пирит (FeS_2), гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), апатит ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F})_2$), маркирующие в отложениях лишь некоторые горизонты или прослои, которые иногда имеют измененный цвет.

В ходе исследования минерального состава псаммитовой гранулометрической фракции, как в тяжелой, так и в легкой минеральной подфракциях, а также в петрографических шлифах были обнаружены черные зерна округлой или удлиненной формы с характерным маслянистым блеском. Сложный элементный состав, полученный по данным СЭМ, не позволил идентифицировать их как какой-либо минерал. При схожем облике состав мог кардинально меняться не только от зерна к зерну, но и внутри одного зерна. Широкие наблюдаемые вариации содержания атомарного углерода (от 5 до 29 %) и разнообразие минерального состава в точках сканирования на поверхности минеральных зерен данного типа позволило сделать вывод о роли углеводородов в формировании данных агрегатов, которые могут включать минеральные зерна разнообразного состава и размерности, склеенные и покрытые пленкой битумоида. Наличие в составе данных минеральных зерен углеводородов смолисто-асфальтеновой фракции было подтверждено методом люминесцентной микроскопии.

Для образцов из горизонтов с характерными структурно-текстурными особенностями выполнялся люминесцентно-битуминологический анализ капиллярных вытяжек с последовательным использованием в качестве растворителей петролейного эфира (выделение маслянистой фракции) и бензола (выделение смолисто-асфальтеновой фракции). Наибольшая ширина капиллярных зон петролейно-эфирного экстракта соответствует интервалам «хардграундов». Наиболее темные цвета бензольного экстракта характерны для образцов с наибольшим количеством черных зерен, определенных как битуминозные агрегаты.

Выводы

По результатам литолого-минералогических исследований в формировании аутигенных новообразований и минералов в исследованных осадочных отложениях ведущую роль играет

железо. Можно сделать вывод о разнообразии микробиальных сообществ на разных уровнях осадочного разреза. В западной части района исследований наблюдаемые структурно-текстурные особенности формировались под влиянием процессов, протекающих в подледниковой среде и перигляциальной зоне ледника. В восточной части района исследований многие структурно-текстурные особенности связаны с неравномерным распределением органического вещества по осадочному разрезу.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках темы госзадания ГИН РАН № FMMG-2022-0001. Сбор и обработка сейсмоакустических данных выполнялись в рамках темы госзадания ИО РАН № FMWE-2021-005

Список литературы:

1. Гайнанов В.Г., Поляк Л.В., Гатауллин В.Н., Зверев А.С. Сейсмоакустические исследования следов покровных оледенений в Карском море // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. – 2005. – № 1. – С. 38–44.
2. Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестник МГУ. Серия 5: География. – 2023. – Т. 78 – № 3. – С. 104–124.
3. Ласточкин А.Н. Подводные долины северного шельфа Евразии // Известия Всесоюзного географического общества. – 1977. – Т. 109. – № 5. – С. 412–417.
4. Левитан М.А., Хусид Т.А., Купцов В.М. и др. Типы разрезов верхнечетвертичных отложений Карского моря // Океанология. – 1994. – Т. 34. – № 5. – С. 776–788.
5. Мусатов Е.Е. Палеодолины Барнцево-Карского шельфа // Геоморфология. – 1998. – № 2. – С. 90–95.
6. Павлидис, Ю.А. Палеогеография и оледенение арктического шельфа в позднем плейстоцене // Океанология. – 1997. – Т. 37. – № 6. – С. 910–914.
7. Рекант П.В., Васильев А.А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря // Криосфера Земли. – 2011. – Т. 25. – № 4. – С. 69–72
8. Сухих Е.А. Роль углеводородов в формировании литологической границы типа «хардграунд» в верхнем слое донных осадков в западной части Карского моря // Пустоваловские чтения 2022. Материалы традиционной конференции, посвященной 120-летию Л.В. Пустовалова. Москва. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. – 2022. – С. 142–144.
9. Linch L.D., Meer van der, J.J.M., Menzies J. Micromorphology of iceberg scour in clays: Glacial Lake Agassiz, Manitoba, Canada // Quaternary Science Reviews. – 2012. – Vol. 55. – P. 125–144.
10. Meer van der, J.J.M., Menzies J. The micromorphology of unconsolidated sediments // Sedimentary Geology. – 2011. – Vol. 238. – P. 213–232.
11. Patton H., Hubbard A., Andreassen K. et al. Deglaciation of the Eurasian ice sheet complex // Quaternary Science Reviews. – 2017. – V. 169. – P. 148–172.

12. Serov P., Portnov A., Mienert Ju. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // Journal of Geophysical Research – Earth Surface. – 2015. – Vol. 120(8). – P. 1515–1529.

УДК 551.242.4

Рубрика 38.17.91

РАЗЛОМЫ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И СВИДЕТЕЛЬСТВА ИХ СОВРЕМЕННОЙ АКТИВНОСТИ

THE LAPTEV SEA FAULTS AND EVIDENCE OF THEIR RECENT ACTIVITY

Рукавишникова Дарья Дмитриевна, Баранов Борис Викторович., Дозорова Каринэ Ашотовна, Цуканов Николай Васильевич, Крылов Артем Александрович

ИО РАН, Москва

Rukavishnikova Daria Dmitrievna, Baranov Boris Viktorovich, Dozorova Karine Ashotovna, Tsukanov Nikolay Vasilievich, Krylov Artem Alexandrovich

IO RAN, Moscow

В фундаменте и осадочном чехле моря Лаптевых выделяется множество разломов, приуроченных к срединно-океаническому хребту Гаккеля и к Лаптевоморской рифтовой системе. Свидетельством их современной активности могут являться: (1) выход на поверхность и выраженность в рельефе, (2) землетрясения и (3) сфокусированные выбросы газа (газовые сипы). Целью данного исследования является выявление положения активных разломных зон моря Лаптевых на основании анализа тектонического строения региона и признаков тектонической активности разломов. В основе работы обобщение опубликованных материалов о строении фундамента, сейсмичности, рельефе дна, строении верхней части осадочного чехла моря Лаптевых, а так же о расположении газовых сипов на его акватории.

Разрывные нарушения в пределах акватории моря Лаптевых приурочены к спрединговому хребту Гаккеля, разделяющему котловины Нансена и Амундсена, и к системе горстов и грабенов континентального рифтинга на шельфе [Грамберг и др., 1990]. В пределах района исследований хребет Гаккеля теряет свою морфологическую выразительность и переходит в неглубокую долину, сопровождаемую по обеим сторонам пологими валообразными поднятиями. На сейсмических профилях видно, что долина заполнена осадками в которых наблюдаются разрывные нарушения, выходящие на поверхность с формированием серии уступов высотой в десятки метров [Пискарев, 2018].

В пределах лаптевоморского шельфа горсты и грабены, ограниченные разломами СЗ простирания, формируют три крупные структурные единицы (рис. 1а): Усть-Ленскую рифтовую систему, Восточно-Лаптевоморской провинцию горстов и грабенов (ВЛПГГ) и рифтовую зону Анжу (Drachev et al., 2018). Провинция горстов и грабенов ограничена с востока и с запада, где она отделяется от Усть-Ленской рифтовой системы, глубинными срывами растяжения (детачментами растяжения).

На севере, в районе бровки шельфа разломы Усть-Ленской рифтовой системы, рифтовой зоны Анжу и Восточно-Лаптевоморской провинции ограничены Хатанго-Ломоносовской зоной разломов, ориентированной в ЮЗ–СВ направлении (рис. 1а). Хатанго-Ломоносовская зона разломов (ХЛЗР) была выделена по структуре геофизических полей и рассматривалась в качестве трансформного разлома, образовавшегося в палеоцене одновременно с хребтом Гаккеля и отделяющего океаническую литосферу Евразийского бассейна от утоненной

континентальной литосферы моря Лаптевых [Drachev et al., 2018; Шипилов и др., 2019]. На отдельных участках Хатанго-Ломоносовская зона проявляется не только в геофизических полях, но и в рельефе [Головачев, Шипилов, 1986; Баранов и др., 2018].

Землетрясения являются одним из наиболее ярких свидетельств современной тектонической активности разломов. В пределах Лаптевоморского региона выделяются три основные зоны концентрации землетрясений [Аветисов, 2000].

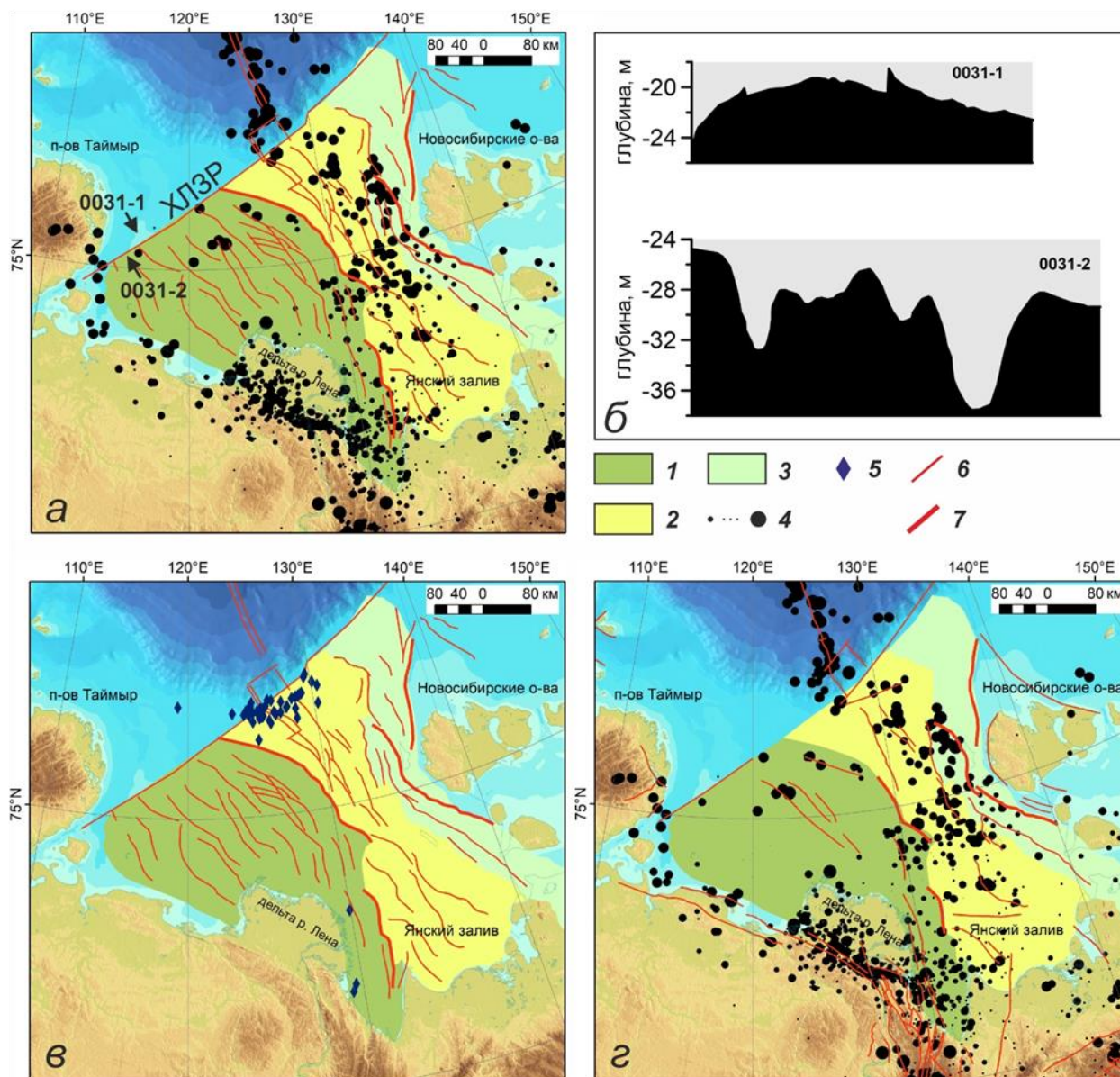


Рис. 1. (а) Сейсмичность моря Лаптевых (Крылов и др., 2022) и схема основных разломов, показанных тонкими красными линиями, жирными линиями обозначены срывы растяжения (Drachev et al., 2018), ХЛЗР – Хатанго-Ломоносовская зона разломов.; (б) батиметрические профили через Хатанго-Ломоносовскую зону разломов (0031-1) и сопряженный с ней грабен (0031-2) (Баранов и др., 2018). Положение профилей см. на рис.1а; (в) положение метановых сипов (Shakhova et al., 2015; Baranov et al., 2020) и схема основных разломов; (г) схема активных разломов. Батиметрия - International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO). См. текст для дальнейшего пояснения.

- 1- Усть-Ленская рифтовая система, 2 – Восточно-Лаптевоморская провинция горстов и грабенов; 3 – рифтовая зона Анжу; 4 - эпицентры землетрясений из сводного каталога ЕГС РАН, ISC и USGS и зарегистрированных донными сейсмостанциями; 5 -

положение метановых сипов; 6– Основные разломы и разломные зоны 7 – срывы растяжения (детачменты растяжения).

Наиболее примечательная зона концентрации событий прослеживается от хребта Гаккеля до Янского залива (рис. 1а). В пределах хребта Гаккеля ее ширина составляет 80 км, на шельфе моря Лаптевых она достигает сотни километров. От места сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых в юго-западном направлении прослеживаются две линейные цепочки эпицентров. Зона многочисленных эпицентров протягивается по южному обрамлению моря Лаптевых от п-ва Таймыр к дельте Лены.

Сфокусированные выходы метана (газовые сипы) в море Лаптевых были обнаружены и исследованы на внешнем шельфе и к востоку от дельты Лены (рис. 1в). К востоку от дельты Лены находятся только три поля, остальные 112 полей, которые включают в себя множество метановых сипов, расположены на внешнем шельфе в интервале глубин 50–90 м [Shakhova et al., 2015; Baranov et al., 2020].

Выше отмечалось, что критериями современной активности разломов является их сейсмическая активность, выраженность разломов в рельефе, и приуроченность к разломам газовых сипов. На основании этого в пределах моря Лаптевых были выделены две области, различающиеся по структурному рисунку существующих здесь активных разломов (рис. 1г).

Первая область включает в себя хребет Гаккеля, который характеризуется высокой сейсмичностью. В рифтовой долине хребта, заполненной осадками, на сейсмических профилях видны многочисленные разломы, которые секут осадочную толщу и выражены в рельефе в виде уступов [Пискарев и др., 2018]. Это, а также общее представление о природе этой структуры, дает основание считать, что активные процессы приурочены к его осевой части.

Вторая область соответствует Лаптевоморской рифтовой системе, где на обширной площади выделяется множество разломов, однако не для всех из них существуют свидетельства современной активности. Комплексная интерпретация глубинных сейсмических и сейсмоакустических разрезов показала, что, по крайней мере, некоторые разломы выходят на поверхность и смещают современные отложения, формируя уступы [Рекант, Гусев, 2009; Пискарев и др., 2018]. Такие структуры позволяют подтвердить наличие активных разломов к северо-западу от дельты Лены [Государственная геологическая..., 2014] и на юге ВЛПГГ [Государственная геологическая..., 2016]. Современные уступы, сформированные движениями вдоль сбросов, описаны в нескольких точках моря Лаптевых [Рекант, Гусев, 2009]. Многочисленные сбросы по данным сейсмоакустической съемки зафиксированы у подножия континентального склона в месте окончания срединно-океанического хребта Гаккеля [Рекант, Гусев, 2009; Баранов и др., 2019; Baranov et al., 2020].

Активность разломов, проявляющаяся в сейсмичности, наиболее ярко выражена на Восточно-Лаптевоморской провинции горстов и грабенов и в рифтовой зоне Анжу и, вероятно, обусловлена смещениями по оперяющим разломам, связанным со срывом растяжения, ограничивающим рифтовую зону Анжу с востока и падающим на запад. Узел тектонической активности располагается на стыке Восточно-Лаптевоморской провинции горстов и грабенов, Хатанго-Ломоносовской зоны разломов и хребта Гаккеля (рис. 1а). Распределение эпицентров землетрясений указывает на существование поперечного/трансформного разлома между хребтом и провинцией. К этому сочленению также приурочена область метановых сипов вытянутая в ЮЗ–СВ направлении параллельно Хатанго-Ломоносовской зоне разломов (рис. 1в). Последняя характеризуется относительно слабой сейсмической активностью, однако отдельные ее участки на западном окончании и в

точке сочленения отчетливо проявляются в рельефе дна в виде небольших уступов или узких рытвин (рис. 1б) [Баранов и др., 2017].

Область дельты р. Лена — п-ов Таймыр, если судить по распределению землетрясений, также характеризуется высокой активностью. Здесь была выделена система активизированных разломов, среди которых преобладают сдвиговые нарушения [Имаева и др., 2019]. Структуры растяжения, характерные для процессов рифтогенеза, затронувшего акваторию шельфа моря Лаптевых, в пределах дельты р. Лена не выявлены [Имаева и др., 2019]. В противоположность, при движении вдоль этой границы с юго-востока на северо-запад наблюдаются условия сжатия.

В результате работы была составлена схема активных разломов моря Лаптевых (рис. 1г). Системы активных разломов известны вдоль рифтовых систем шельфа, сосредоточены вдоль срывов растяжения. Специфическими свидетельствами подтверждается активность участков сдвиговой зоны ХЛЗР.

Землетрясения, разломы и газовые сипы представляют собой потенциальные геологические опасности, активно участвуют в формировании современного рельефа дна и влияют на физические свойства осадочного чехла, что необходимо учитывать при прокладке подводных коммуникаций и трубопроводов.

Финансирование

Исследование/проект выполнен в рамках государственного задания № FMWE-2021-0004 (описание положения крупных тектонических структур), при финансовой поддержке в рамках гранта РФФИ № 23-17-00125 (анализ свидетельств об активности разломов, картирование распределения землетрясений, разломов и газовых сипов в контексте анализа геопасностей).

Список литературы:

1. Аветисов Г. П., Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб: ВНИИОкеангеология. 2000. Вып. 3. С. 104–114.
2. Баранов Б. В., Флинт М. В., Римский-Корсаков Н. А., Поярков С. Г., Дозорова К. А. Структурные свидетельства современной активности Хатангско-Ломоносовской зоны разломов в море Лаптевых // Доклады академии наук, 2018, том 480, № 3, с. 344–347.
3. Богоявленский В. И. Казанин А. Г. Кишанков А. В. Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика, т. 11, № 2, 2021. с. 178-194.
4. Головачев Э.М., Шипилов Э.В. Линеаментные зоны моря Лаптевых. Известия вузов. Геология и разведка. 1986. №8. с. 106-108.
5. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение) Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-51 – Оленёкский зал., S-52 – дельта р. Лены. Карта четвертичных образований. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014.

6. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Лаптево-Сибироморская. Лист S-53 (о. Столбовой), 54 (Ляховские о-ва). Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2016.
7. Грамберг И. С., Деменицкая Р. М., Секретов С. Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Гаккеля-Момского рифта // Докл. АН СССР. 1990. Т. 311. № 3. С. 689—694.
8. Крылов. А. А., Лобковский Л. И., Рукавишников Д. Д., Баранов Б. В., Ковачев С. А., Дозорова К. А., Цуканов Н. В, Семилетов И. П. Новые данные о сейсмоструктурном строении моря Лаптевых по наблюдениям донных сейсмостанций // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. том 507. № 1. с. 98–103.
9. Имаева Л.П., Гусев Г.С., Имаев В.С. Динамика рельефа и сейсмоструктурная активизация новейших структур дельты р. Лена. Геотектоника, 2019, № 5, с. 62—77.
10. Пискарев А. Л., Аветисов Г.П., Киреев А.А., Казанин Г.С., Поселов В.А., Савин В.А., Смирнов О.Е., Элькина Д.В. Строение зоны перехода шельф моря Лаптевых - Евразийский бассейн (Северный Ледовитый Океан) // Геотектоника. 2018. № 6. С. 3-24. DOI:10.1134/S0016853X18060061
11. Рекант П.В., Гусев Е.А. Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. №2(82).с. 85-94
12. Сейсмоструктура северо-восточного сектора Российской Арктики // Под ред. Л.П. Имаевой, И.И. Колодезникова. Ин-т земной коры СО РАН, Ин-т геологии алмаза и благородных металлов СО РАН. Новосибирск: Изд-во СОРАН. 2017. 134 с.
13. Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И. Хатангско-Ломоносовская зона разломов: строение, тектоническая позиция, геодинамика // Арктика: экология и экономика. 2019. № 3 (35). С. 47—61.
14. Drachev S.S. Laptev Sea Rifted Continental Margin: Modern Knowledge and Unsolved Questions // Polarforschung. 2000. V. 68. No. 1–3. P. 41–50.
15. Drachev S.S., Mazur S., Campbell S., Green C., Shkarubo S.I., Tishchenko A. Crustal architecture of the Laptev Rift System in the East Siberian Arctic based on 2D long-offset seismic profiles and gravity modelling // Petroleum Geoscience. 2018. V. 24. P. 402–413. <https://doi.org/10.1144/petgeo2016-143>
16. Baranov B., Galkin S., Vedenin A., Dozorova K., Gebruk A., Flint M. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna // Geo-Marine Letters (2020) 40:541–557. DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7
17. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost related methane fluxes and role of sea ice // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2015. V. 373. ArticleID: 20140451.
18. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Part 1. Model description and validation // J. Geoph. Res. – 1999. – Vol. 140, No. C4. – P. 7649–7666.

УДК 550.8.052, 550.834.05

Рубрика 37.25.51

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЛЕКСНОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ НА ПЛОЩАДИ ВБЛИЗИ О-ВА УЕДИНЕНИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ)

STRUCTURE ASPECTS OF THE UPPER PART OF THE SECTION IN THE NORTH KARA SEA BASED ON THE RESULTS OF COMPLEX INTERPRETATION

Буланова Ирина Андреевна¹, Терёхина Яна Евгеньевна², Понимаскин Алексей Игоревич¹, Колюбакин Андрей Анатольевич³

¹ *Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В.Ломоносова (ЦАСД), г. Москва*

² *Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), г. Москва*

³ *ООО "РН-Эксплорейшн", г. Москва*

Bulanova Irina Andreevna¹, Terekhina Yana Evgenievna², Ponimiskin Alexey Igorevich¹, Kolyubakin Andrey Anatolievich³

¹ *Seismic Data Analysis Center, Moscow (SDAC), Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow*

³ *LLC "RN-Exploration ", Moscow*

Введение

Северные области Карского шельфа изучены относительно слабо, однако, по имеющимся геолого-геофизическими данным известно, что они обладают высоким углеводородным потенциалом и сложным геологическим строением. В последние годы в связи с активным освоением Северо-Карского шельфа значительно возрос интерес к изучению инженерно-геологических условий в верхней части геологического разреза в этом районе. Для минимизации возможных рисков при бурении морских скважин проводятся геолого-геофизические исследования, позволяющие детально исследовать интервал разреза примерно до 1000 м ниже уровня дна. К областям, представляющим опасность при бурении, в том числе, относятся области распространения газонасыщенных отложений, многолетнемерзлых грунтов, приповерхностных и погребенных палеоврезов и т.д. Выявление и изучение газонасыщенных областей на территории изучаемого района также интересно с точки зрения нефтегазовых ресурсов и имеет важное научное значение.

В данном регионе накоплен материал, включающий региональные профили 2D, 3D-данные, а также более высокочастотные данные (ССВР, АПр) и площади детальных исследований МЛЭ. Информация, полученная по нескольким разночастотным методикам сейсмоакустических исследований, а также по данным геологического пробоботбора, позволяет осуществить детальное картирование исследуемого полигона и более точно описать строение разреза.

Результаты

В ряде областей сейсмогеологические условия осложнены присутствием вертикальных зон потери корреляции, связанных с наличием интервалов повышенной газонасыщенности. На данных участках резко ухудшается корреляция отражений в верхней части разреза, приблизительно до 800 мс. Также встречается «ложное» прогибание вниз осей синфазности и области видимого снижения частоты регистрируемых колебаний.

Возрастная привязка выделенных СК основана на сопоставлении данных с региональной сеймостратиграфической схемой. Согласно схеме СК 1 соответствует нерасчлененной толще отложений позднемелового-четвертичного возраста (K_2+Q); СК 2 – раннемеловые отложения (K_1); СК 3 – юрские отложения (J); СК 4 – отложения триаса + каменноугольно-пермские отложения ($T + C-P$); СК 5 – средне-позднедевонские отложения (D_{2-3}) (Рис. 2). В рамках данной работы наибольший интерес представляет сеймокомплекс 1.

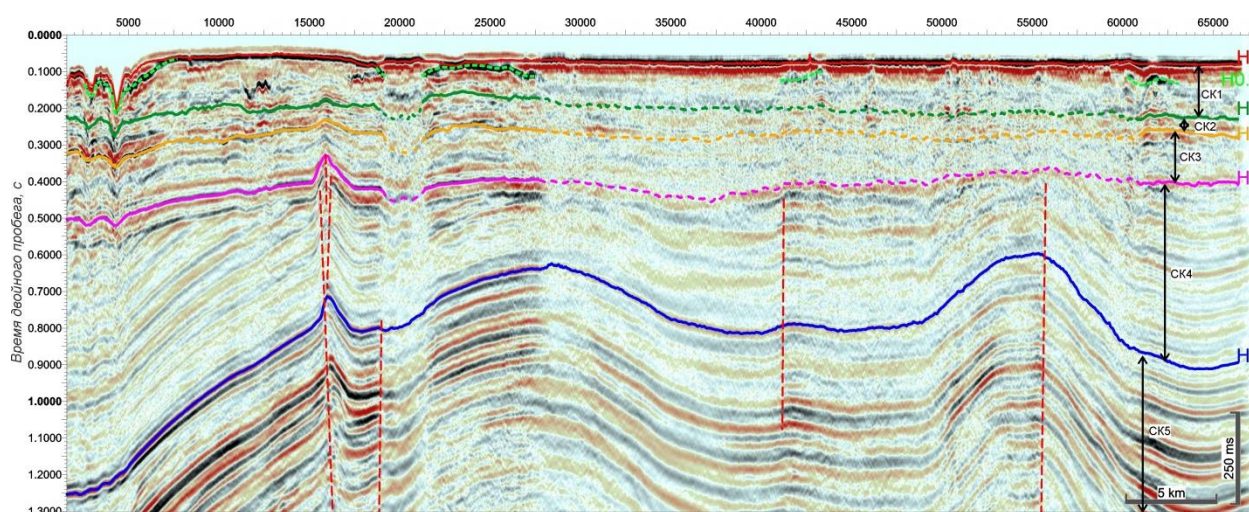


Рис. 1. Пример выделения сейсмических комплексов

СК1 можно разделить на два подкомплекса, разделенных поверхностью несогласия. Корреляция данной границы затруднительна, в первую очередь, в связи с тем, что мощность СК1.1 мала по сравнению с разрешающей способностью основного объема данных, тем не менее в местах, где мощность увеличивается граница проводится отчетливо. Также данная граница уверенно прослеживается на высокоразрешающих данных ССВР и АПр и соотносится с подошвой четвертичных отложений (Рис. 2). Толща четвертичных отложений распространена неравномерно, местами выклинивается и сменяется областями выхода коренных отложений на морское дно.

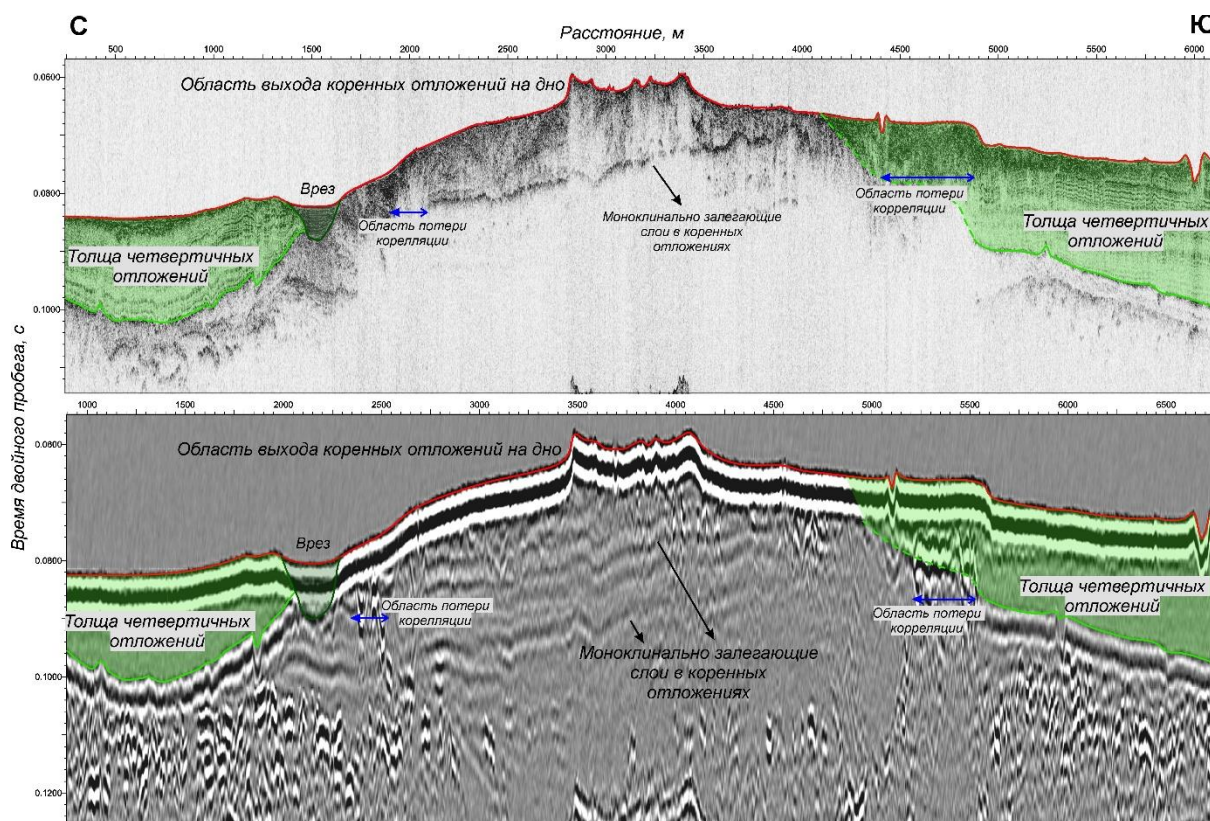


Рис. 2. Пример выделения толщи четвертичных отложений на разрезе АПр и ССВР

Для получения дополнительных сведений о структурных особенностях строения среды, о границах и внутреннем строении изучаемых объектов проводился анализ динамических особенностей волновой картины. В рамках анализа были рассчитаны атрибуты волнового поля (динамические, частотные, геометрические, частотно-временные преобразования) в верхней части разреза.

На многих атрибутных картах прослеживается обширная аномальная область, предположительно соответствующая зоне распространения газонасыщенных отложений. Контур данной области по всем рассчитанным атрибутам повторяется, однако наблюдаются различные изменения внутри выделенного контура, маркирующие изменения волновой картины в рамках обнаруженной аномалии, что может говорить об изменении внутренней структуры и свойств области повышенной газонасыщенности (Рис. 3).

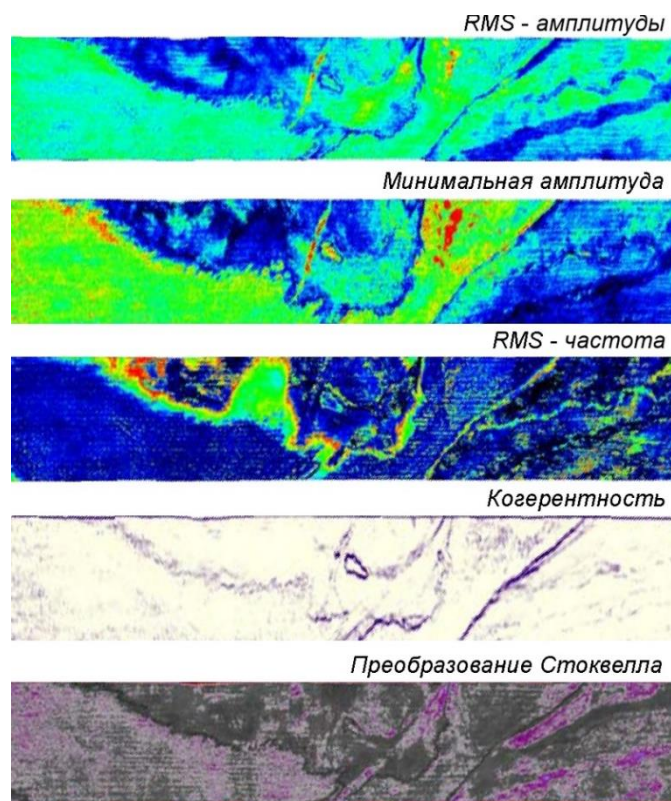


Рис. 3. Сравнение некоторых рассчитанных атрибутов волнового поля

По высокочастотным архивным данным видно, что кровля газонасыщенных отложений находится в 5-15 м ниже уровня дна. В одних случаях газ предположительно концентрируется в относительно крупнозернистых (опесчаненных) проницаемых прослоях, перекрытых глинистыми грунтами. В этих случаях на сейсмических разрезах фиксируются амплитудные аномалии типа «яркое пятно» с обратной полярностью отражений. На других участках на сейсмических разрезах наблюдается поверхность рассеянного газа, не формирующего скоплений. При этом часто наблюдаются признаки вертикальной миграции газа (Рис. 4). Области распространения газа распространены в местах развития четвертичных отложений.

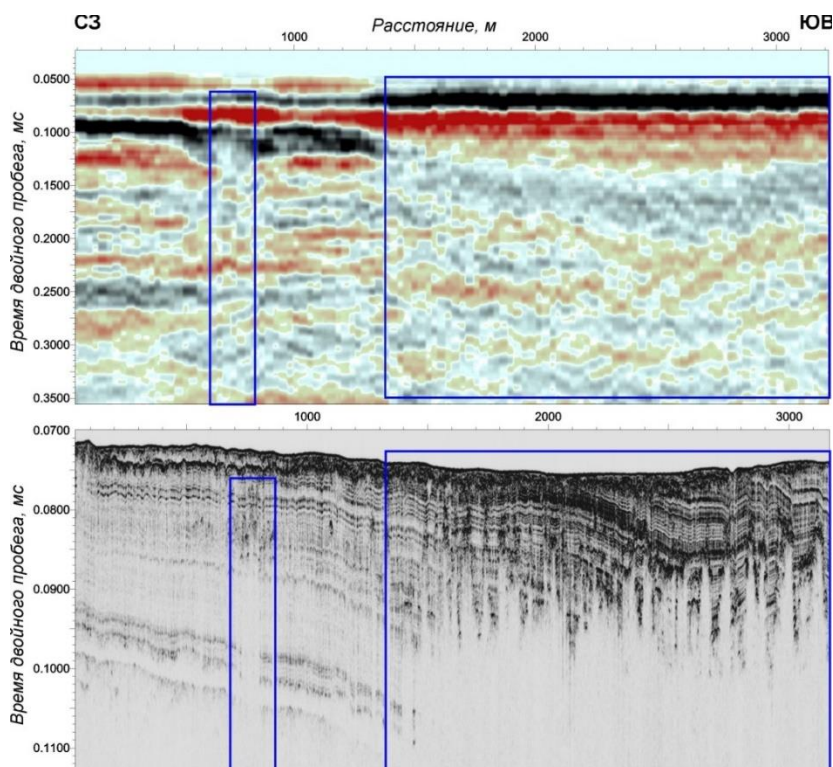


Рис. 4. Сравнение зоны газонасыщенности на данных СР (вверху) и АПр (внизу). Синим показаны области распространения интервалов повышенной газонасыщенности

Кроме того, на полигоне наблюдается большое разнообразие форм рельефа. Наиболее ярко выраженными формами рельефа являются приповерхностные врезы, частично заполненные осадками. Также в рельефе дна отмечается структуры, особенности которых позволяют отнести их к посткриогенным образованиям: предположительные следы полигональных структур, термокарстовые котловины и сеть линейно вытянутых непротяженных бугров высотой до 2 м. Также обнаружена и закартирована система малоглубинных палеоврезов.

Выводы

В результате интерпретации обнаружены области существования амплитудных аномалий, связанных с повышенной газонасыщенностью отложений. Они характеризуются различными размерами и сопутствующими сейсмическими признаками. Положение аномалий по всем атрибутам совпадает, однако на некоторых атрибутах отмечается неоднородность описываемой зоны. Наличие обширных областей газонасыщенности в верхней части разреза может быть связана как с миграцией газа по тектонически ослабленным зонам из глубинных горизонтов, так и с посткриогенным газом, образующимся при деградации субаквальных многолетнемерзлых пород. Кроме того, обнаружены и закартированы различные формы рельефа дна, сделано предположение об их происхождении.

Привлечение разночастотных данных к интерпретации позволяет уточнить происхождения отдельных объектов участка, детально выделить особенности разреза, а также улучшить общее понимание процессов, произошедших на данном участке акватории в прошлом.

Список литературы:

1. Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря. Доклады Академии Наук, 2019, том 489, №3, с.272-276
2. Васильев В. В., Вискунова К. Г., Кийко О. А., Козлов С. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41–44 – мыс Желания. Объяснительная записка. Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2013 г. – 200 с.
3. Юмашева А.К., Полудеткина Е.Н., Токарев М.Ю., Рубалко А.Е., Киль А.О. Зоны фокусированной разгрузки углеводородов как индикатор нефтегазоносности недр Северо-Карского бассейна. Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Выпуск 9, 2022.

УДК 550.834.05

Рубрика 38.21.31

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИЧАСТОТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ
СТРАТИГРАФИЧЕСКОГО БУРЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ПОДНЯТИЯ ДЕ-ЛОНГА,
ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ)

APPLICATION OF MULTI-FREQUENCY RESEARCH FOR THE STRATIGRAPHIC
DRILLING (THE DE LONG RISE, EAST SIBERIAN SEA)

**Замотина Злата Сергеевна¹, Хлебникова Оксана Александровна¹, Понимаскин
Алексей Игоревич², Терёхина Яна Евгеньевна¹, Токарев Михаил Юрьевич¹, Махова
Ольга Сергеевна³, Колюбакин Андрей Анатольевич⁴**

¹ Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² ООО "Центр анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова", г. Москва

³ ООО "Арктический научный центр", г. Москва

⁴ ООО "РН-Эксплорейшн", г. Москва

**Zamotina Zlata Sergeevna¹, Khlebnikova Oxana Aleksandrovna¹, Ponimaskin Alexey
Igorovich², Terekhina Yana Evgenievna¹, Tokarev Mikhail Yurievich¹, Makhova Olga
Sergeevna³, Kolyubakin Andrey Anatolyevich⁴**

¹ Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow

² LLC "Seismic Data Analysis Center Lomonosov Moscow State University", Moscow

³ LLC "Arctic Science Center", Moscow

⁴ LLC "RN-Exploration", Moscow

Введение

В настоящее время проводится комплекс работ, направленных на освоение нефтегазового потенциала осадочных бассейнов Российской Арктики. Одним из эффективных видов исследований выступает стратиграфическое бурение, целью которого является составление максимально достоверной модели геологического строения изучаемого региона посредством получения керна из глубоких целевых горизонтов. Сведения, полученные в результате бурения, а именно вещественный состав, свойства, возраст отложений, сопоставляются со всеми имеющимися данными о геологическом строении региона, в том числе результатами геофизических работ, а также данными прямых методов исследования на прилегающей материковой суше и островах, что позволяет детализировать особенности строения и историю развития морского осадочного бассейна. В некоторых арктических бассейнах такую задачу возможно решить с помощью малоуглубинных скважин. Преимущество бурения стратиграфических скважин с геотехнического судна состоит в том, что это относительно простой и экономически эффективный способ получения информации об осадочном разрезе в условиях Арктического шельфа по сравнению с проектированием, организацией и сопровождением глубокого бурения.

Важным этапом в проектировании буровых работ является выбор оптимальной точки заложения скважины, который в значительной степени основывается на анализе сейсмических материалов. Традиционно изучение глубоко залегающих целевых горизонтов на этапе поисково-оценочного этапа геологоразведочных работ проводится по данным 2D сейсморазведки стандартного разрешения (2D CR) методом отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). Для целей малоглубинного стратиграфического бурения вертикальной и горизонтальной разрешающей способности данных 2D CR недостаточно для анализа верхней части разреза (0-1000 м по грунту) (ВЧР), в интервале которой планируется заложение скважины. Однако существуют методы специализированной обработки материалов 2D CR, способствующие улучшению качества сейсмического изображения в ВЧР. Для детального изучения первых сотен метров разреза от поверхности морского дна эффективно привлекать данные мультисоставных сейсмоакустических исследований, включающих в себя 2D/3D сейсморазведку высокого (СВР), сверхвысокого (ССВР) и ультравысокого (СУВР) разрешения [Замотина и др., 2021].

Решение о проведении стратиграфического бурения в районе поднятия Де-Лонга, на внешней части шельфа Восточно-Сибирского моря, принималось исходя из фундаментальных научных задач, а также решения геополитических вопросов [Добрецов, Конторович, 2013; Лаверов и др., 2013]. В указанном районе достаточно детально проведено дистанционное изучение строения разреза геофизическими методами (преимущественно сейсморазведкой стандартного частотного диапазона), что позволило исследователям построить большое количество моделей геологического строения региона и стратиграфии отложений [Лучицкая, Соколов, 2021]. Ближайший район, который обследован прямыми методами - группа островов Де-Лонга на крайнем северо-востоке архипелага Новосибирские острова [Кораго и др., 2014, Матушкин, 2016, Чернова и др., 2017]. При постановке задачи для проведения малоглубинного стратиграфического бурения одной из основных целей являлась непосредственная проверка стратиграфической привязки сейсмических данных, что должно было позволить оценить достоверность существующих моделей строения внешней части шельфа Восточно-Сибирского моря.

Материалы и методы

Для определения оптимального положения точки бурения были проведены полевые геофизические работы летом 2022 года, в ходе которых проводилась 2D сейсморазведка высокого разрешения (2D СВР) по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). Полученные данные характеризуются рабочим диапазоном частот 50–300 Гц с центральной частотой 110 Гц. Вертикальная разрешающая способность данных составляет 3-7 м при глубинности 540 м ниже уровня дна (н.у.д.).

В ходе работ привлекались данные прошлых лет 2D сейсморазведки МОГТ стандартного разрешения (2D CR) с рабочей полосой частот 5–70 Гц. Для повышения качества архивных данных и их разрешающей способности была выполнена их специализированная обработка, что позволило повысить степень достоверности последующей интерпретации. На этапе заложения скважины стратиграфическая привязка и сведения о вещественном составе верхней части разреза основывалась на всей доступной геолого-геофизической информации района работ [Gramberg et al., 2004; Layer et al., 1992; Prokopiev et al., 2013; Ershova et al., 2016 и др.].

Результаты

В ходе интерпретации данных 2D СР было выделено восемь сейсмических комплексов, слагающих два структурных этажа, разделенных поверхностью регионального углового несогласия. Для верхних шести комплексов характерна преимущественно параллельно-слоистая волновая картина с пологозалегающими осями синфазности. На анализируемых данных прослеживается постепенное уменьшение их мощности до полного выклинивания некоторых из них в юго-юго-восточном направлении. В верхней части разреза (до 300 м ниже уровня дна) наблюдаются аномалии обратной полярности, что может свидетельствовать о повышенном содержании газа в отложениях. Нижележащий интервал разреза характеризуется преимущественно акустически прозрачной волновой картиной с периодически прослеживающимися наклонными осями синфазности разной интенсивности. Этот интервал осложнен многочисленной серией разрывных нарушений. Нижний интервал соответствует комплексу фундамента, верхний - осадочного чехла, и они разделены поверхностью регионального несогласия (рис. 1 А).

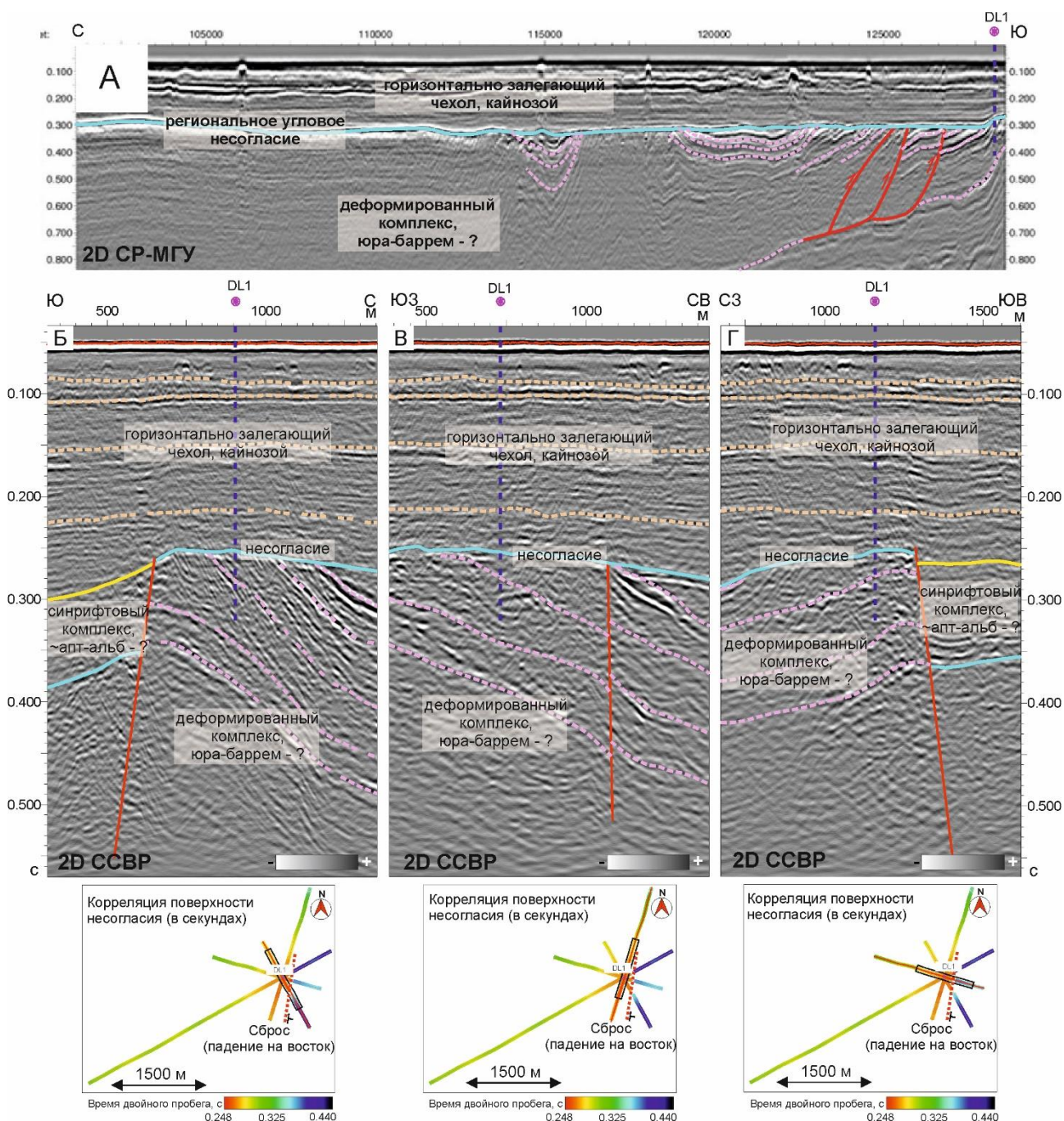


Рис. 1. Фрагменты сейсмических профилей с интерпретацией. А - данные 2D сейсморазведки стандартного разрешения (2D CP) после специализированной обработки. Б-Г - данные 2D сейсморазведки высокого разрешения (2D CBP).

Анализ данных 2D CP позволил определить участки разреза, наиболее подходящие для заложения малоуглубинной стратиграфической скважины. В виду того, что одной из целей стояло уточнение строения фундамента, а также определение наличия меловых трапповых вулканитов в разрезе, было необходимо, в первую очередь, определить местоположения наиболее близкого залегания кровли фундамента к поверхности морского дна. По данным 2D CP было определено, что кровля постепенно поднимается в юго-восточном направлении, а также что внутреннее строение фундамента осложняется наличием многочисленных разрывных нарушений, образующих складчато-надвиговую структуру. Выше залегают субгоризонтально слоистые отложения осадочного чехла. Для более подробного изучения геологического строения юго-юго-восточной части площади были привлечены данные 2D

СВР. На рисунках (рис. 1 Б-Г) показаны фрагменты разрезов высокоразрешающей сейсморазведки, иллюстрирующих детальное расчленение геологического разреза в месте максимально близкого залегания кровли фундамента. В результате сейсмостратиграфического анализа было идентифицировано 4 сейсмокомплекса в верхнем интервале разреза и серия подкомплексов - в нижнем. Верхняя часть разреза характеризуется преимущественно параллельно-слоистым типом сейсмической записи, отражения расположены конформно по отношению друг к другу и предположительно представляют собой кайнозойские осадки. Отражающая граница, разделяющая верхнюю и нижнюю части разреза, является поверхностью регионального углового несогласия между молодыми кайнозойскими и древними отложениями фундамента. На сейсмических разрезах наблюдается разрывное нарушение сбросового типа, свидетельствующее об обстановках растяжения предположительно в меловой (?) период. Анализ данных 2D СВР за счет более высокой разрешающей способности данных позволил значительно уточнить внутреннее строение разреза чехла и фундамента, проследить тонкие особенности волнового поля. В результате было уточнено место для заложения стратиграфической скважины.

Заключение

Сведения о строении фундамента в пределах поднятия Де Лонга ограничены исследованиями на прилегающих островах, в частности, предполагается, что на границе осадочного чехла и фундамента залегают меловые базальты. Вскрытие базальтов мелового возраста позволит осуществить корреляцию с будущими скважинами на террейнах Менделеева и Ломоносова, что необходимо для получения прямой геологической информации о строении этих структур. Кроме того, определение возраста деформированного комплекса в результате стратиграфического бурения позволит существенно уточнить модель формирования Евразийского и Американо-Североамериканского бассейнов. В качестве оптимального выбора места для заложения стратиграфической скважины был выбран участок, в пределах которого существует возможность пробурить разновозрастные и предположительно разного вещественного состава глубоко залегающие комплексы. Кроме того, было выбрано место бурения скважины таким образом, чтобы она пересекала места выклинивания подкомплексов, отложения которых предположительно представлены меловыми трапповыми базальтами. На данный момент бурение малоуглубинной стратиграфической скважины DL-1 состоялось, результаты опубликованы в работе [Петров и др., 2023].

Благодарность

Авторы благодарят научного руководителя проекта, профессора геологического факультета МГУ, заведующего кафедрой региональной геологии и истории Земли Анатолия Михайловича Никишина за оказанное доверие и возможность принять участие в таком уникальном проекте.

Список литературы:

1. Добрецов Н.Л., Конторович А.Э. Проблемы геологии и нефтегазоносности Арктики (вместо предисловия) // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 967—971.
2. Замотина З.С., Пирогова А.С., Токарев М.Ю., Терёхина Я.Е., Росляков А.Г. Подход к интерпретации мультисекционных сейсмоакустических данных для выявления геологических опасностей на Арктическом шельфе // Труды IV Международной геолого-

- геофизической конференции и выставки ГеоЕвразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях Том II (II). — Т. 2. — ООО ПолиПРЕСС Тверь: 2021. — С. 197–201.
3. Кораго Е.А., Верниковский В.А., Соболев Н.Н., Ларионов А.Н., Сергеев С.А., Столбов Н.М., Проскурнин В.Ф., Соболев П.С., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Травин А.В. Возраст фундамента островов Де-Лонга (архипелаг Новосибирские острова): новые геохронологические данные // Доклады академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2014. – Т. 457. – №. 3. – С. 315-315.
 4. Лаверов Н. П., Лобковский Л. И., Кононов М. В., Добрецов Н. Л., Верниковский В. А., Соколов С. Д., Шипилов Э. В. Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. – 2013. – №. 1. – С. 3-35.
 5. Лучицкая М. В., Соколов С. Д. Этапы гранитоидного магматизма и формирование континентальной коры Восточной Арктики // Геотектоника. – 2021. – №. 5. – С. 73-97.
 6. Матушкин Н.Ю., Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Травин, А. В., Жданова А.И. Геология и возраст основного магматизма на о. Жаннетты (архипелаг Де-Лонга) значение для палеотектонических реконструкций в Арктике // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2016. – Т. 467. – №. 1. – С. 61-68.
 7. Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И., Татаринцов В.Ю., Кашубин С.Н., Прищепенко Д.В., Мальшев Н.А., Данилкин С.М., Вержбицкий В.Е., Коллюбакин А.А., Комиссаров Д.К., Ставицкая В.Н., Шурекова О.В., Разумкова Е.С., Толмачева Т.Ю., Леонтьев Д.И., Токарев М.Ю., Понимаскин А.И., Замотина З.С. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023. — Т. 512, № 2. — С. 100–110.
 8. Чернова А.И., Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Матушкин Н.Ю., Травин, А.В. Палеомагнетизм и геохронология вулканогенно-осадочных пород о. Генриетты (архипелаг Де-Лонга, Северный Ледовитый океан) // Доклады Академии наук. – Федеральное государственное бюджетное учреждение "Российская академия наук", 2017. – Т. 475. – №. 4. – С. 423-427.
 9. Gramberg, I.S., Ivanov, V.L., Pogrebitsky, Yu. Ye (Eds.) Geology and mineral resources of Russia Arctic and Far East Seas, Book 1, Arctic Seas. VSEGEI Press, Saint-Petersburg. — 2004. — Vol. 5. — 468. (in Russian).
 10. Layer, P.W., Vogel, T.A., Fujita, K., Surnin, A.A. Recent volcanism in Yakutia and the East Siberian Shelf, Russia, Implications for the NE Asia Cenozoic stress regime. EOS. Transactions of the American Geophysical. Union 73. (Fall meeting supplement). — 1992. — 563.
 11. Prokopiev A.V., Ershova V.B., Anfinson O., Stockli D., Powell J., Khudoley A.K., Vasiliev D.A., Sobolev N.N., Petrov E.O. Tectonics of the New Siberian Islands archipelago: Structural styles and low-temperature thermochronology // Journal of Geodynamics. – 2018. – Vol. 121. – 155-184.
 12. Ershova V.B., Lorenz H., Prokopiev A.V., Sobolev N.N., Khudoley A.K., Petrov E.O., Solveig E., Sergeev S., Larionov A., Thomsen T.B. The De Long Islands: A missing link in unraveling the Paleozoic paleogeography of the Arctic // Gondwana Research. – 2016. – Vol. 35. – 305-322.

УДК 551.35:551.79:551.8(268.55)

Рубрика 38.21.00

ЭВОЛЮЦИЯ УСЛОВИЙ СЕДИМЕНТАЦИИ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ В ПОЗДНЕМ НЕОПЛЕЙСТОЦЕНЕ-ГОЛОЦЕНЕ

SEDIMENTATION EVOLUTION AND PALEO GEOGRAPHY OF THE COASTAL SHELF AREA OF THE EAST SIBERIAN SEA IN THE LATE PLEISTOCENE-HOLOCENE

Рябчук Дарья Владимировна¹, Талденкова Екатерина Евгеньевна², Сергеев Александр Юрьевич¹, Буданов Леонид Михайлович¹, Жамойда Владимир Александрович¹, Неевин Игорь Александрович¹, Прищепенко Диана Владиславовна¹, Носевич Екатерина Сергеевна¹, Пушина Зинаида Викторовна¹, Григорьев Андрей Глебович¹, Токарев Михаил Юрьевич², Баширова Лейла Джангировна³, Пономаренко Екатерина Петровна³

¹ *ВСЕГЕИ им. А.П.Карпинского, Санкт-Петербург*

² *МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва*

² *ИО РАН им. П.П.Ширшова*

Ryabchuk Daria Vladimirovna¹, Taldenkova Ekaterina Evgenievna², Sergeev Alexander Yurievich¹, Budanov Leonid Mikhailovich¹, Zhamoida Vladimir Alexandrovich¹, Neevin Igor Alexandrovich¹, Prishchepenka Diana Vladislavovna¹, Nosevich Ekaterina Sergeevna¹, Pushina Zinaida Viktorovna¹, Grigoriev Andrey Glebovich¹, Tokarev Mikhail Yurievich², Bashirova Leila Dzhangirovna³, Ponomarenko Ekaterina Petrovna³

¹ *A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint-Petersburg*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow*

Введение

Вопросы геологии, геоморфологии, истории геологического развития и ресурсного потенциала Арктического шельфа привлекают к себе пристальное внимание исследователей. В то же время степень изученности дна морей российской Арктики остается крайне неравномерной. К наиболее слабоизученным акваториям относятся прибрежные районы Восточно-Сибирского моря. Так, до последнего времени, акваториальная часть листов R-58-60 и S-55,56 государственной геологической карты масштаба 1:1000000 в буквальном смысле слова представляла собой «белое пятно». Объем имеющихся данных по сейсмоакустическому профилированию для исследованного района крайне ограничен – экспериментальные геолого-геофизические работы с применением этого метода были осуществлены в 1987-1988 гг. в Колымском заливе, в 2010 году ГНПП «Севморгео» пройден региональный профиль 5AP (к западу от острова Врангеля). Единственная относительно глубокая скважина (650 м) в районе исследований была пробурена на острове Айон [Александрова, 2016]. Ограниченная информация о строении приповерхностного геологического разреза содержится в ряде неопубликованных отчетов 1970-х – 1980-х гг. По данным поверхностного пробоотбора, выполнявшегося на протяжении длительного времени (с 1930-х гг.) специалистами НИИГА-ВНИИОкеангеология, был составлен комплект мелкомасштабных карт (1:2000000),

характеризующих процессы осадконакопления в голоцене [Семенов, 1961; Яшин, 2000 и др.]. Исследования минерального и химического состава донных отложений осуществлялись учеными ДВО РАН [Дударев, 2005; Николаева и др., 2013 и др.] и ИО РАН им. П.П. Ширшова [Мирошников и др., 2020 и др.]. Отсутствие данных сейсмоакустического профилирования и радиоуглеродных датировок четвертичных отложений дна акватории вызвали неоднозначность в интерпретации геологической истории территории в четвертичное время. Полученные в 2018-2022 гг. новые данные позволили несколько продвинуться в понимании геологического развития и эволюции среды седиментации в позднем неоплейстоцене-голоцене.

Материалы и методы исследования

В ходе экспедиций ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 2018 и 2020 гг., организованных в рамках государственного геологического картирования (ГК-1000/3) листов R56-60 и S-55,56, охватывающих прибрежные районы Восточно-Сибирского моря от Новосибирских островов до о-ва Врангеля, было выполнено 3400 км непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) с одновременным использованием нескольких методов (спаркер, пневмопушка, профилограф), 3200 км профилирования методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) и многолучевого эхолотирования, выполнена 191 станция донного пробоотбора с применением бокс-корера, с помощью гравитационной ударной трубки отобрано 29 грунтовых колонок (длиной от 0.25 до 2.5 м) (рис. 1). Работы выполнялись с гидрографического судна «Иван Киреев» (2018 г.) и НИС «Капитан Воронин» (2020 г.). Для всех кернов проведено описание, фотографирование, измерения сопротивления недренированному сдвигу (прочность на сдвиг), геохимические исследования (в том числе, определение содержания Br на рентгеновском сканирующем кристалл-дифракционном спектрометре «СПЕКТРОСКАН-МАКС-Г» для расчета палеосолености по методике А.Г. Григорьева), гранулометрический анализ (каждый 1 см керна) с применением лазерного анализатора размеров частиц Microtrac MrB (в лабораториях ВСЕГЕИ), для 12 колонок - определение содержания органического вещества кулонометрическим методом на экспресс-анализаторе АН-7529 (в лаборатории АО ИО РАН им П.П. Ширшова). Для 11 грунтовых колонок были выполнены геохимические исследования и измерение магнитной восприимчивости в ИО РАН им. П.П. Ширшова с использованием автоматизированной системы для комплексного изучения кернов Geotek MSCL-XYZ. Для опорной колонки 20ВСМ-8 проведено изучение видового состава и численности макрофауны (моллюски) и микрофауны (фораминиферы, остракоды) во фракции >125 мкм. Впервые для исследуемого района в лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США) получены 13 радиоуглеродных дат донных отложений (по рассеянному органическому веществу). Для шести колонок проведен палинологический и диатомовый анализ. В 2022 г. с помощью AMS в Лейбниц лаборатории при Кильском университете (Германия) было выполнено радиоуглеродное датирование пяти образцов раковин моллюсков из опорной колонки 20ВСМ-8 и проведен пересчет в календарный возраст. Скорости седиментации (см/тыс. лет) определены между датированными уровнями.

Для создания цифровой батиметрической модели, необходимой для геоморфологического анализа и интерпретации геолого-геофизической информации при составлении карты четвертичных образований и палеогеографических реконструкций, были использованы морские навигационные карты масштаба 1:500 000 и 1:200 000. В программе ArcGIS оцифрованы точки промеров глубин и изобаты, с помощью модуля ArcGIS «Spatial analyst» выполнена интерполяция методом «Toro to raster».

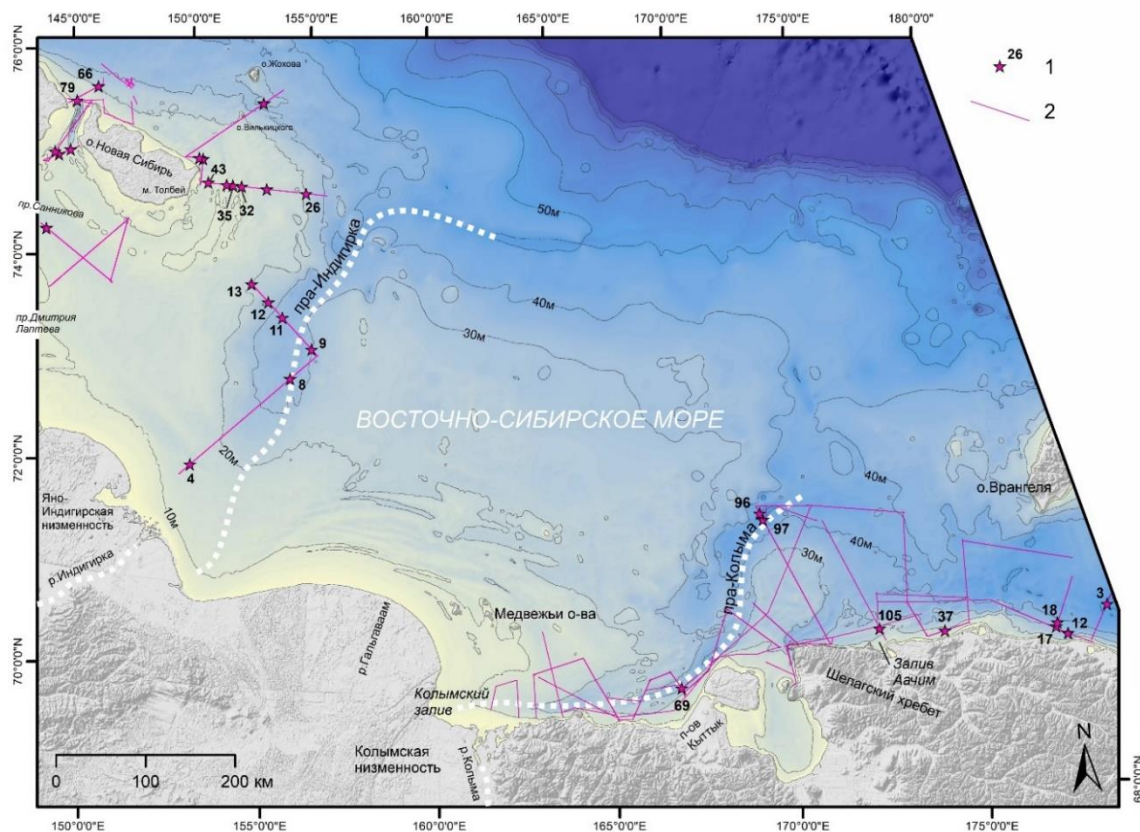


Рис. 1. Схема расположения фактических материалов ВСЕГЕИ 2018 и 2020 гг.: 1 – станции отбора грунтовых колонок; 2 – профили разночастотного НСАП.

Полученные результаты

В разрезе плиоцен-четвертичных отложений прибрежной части Восточно-Сибирского моря по результатам анализа полученных в 2018-2020 гг. материалов сейсмоакустического профилирования и геологического пробоотбора выделены пять сейсмотолщ, в целом, отражающих основные этапы палеогеографического развития региона. На современном уровне знаний сеймостратиграфическая схема выглядит следующим образом (рис. 2): ССТ5 в западной части площади имеет возраст гелазий - нижний неоплейстоцен, в восточной части – гелазий (?) - нижний неоплейстоцен, предположительно при преобладании морских отложений, в разрезе присутствуют озерные и аллювиальные образования. ССТ4 – нижний (?) - средний неоплейстоцен, озерные, аллювиальные и морские нерасчлененные отложения. ССТ3 – верхний неоплейстоцен, морские отложения (казанцевская трансгрессия), озерное отложения либо перерыв в осадконакоплении (зырянская регрессия). ССТ2 – верхнее звено неоплейстоцена, морские отложения (каргинское потепление), коррелируются с молотковским горизонтом едомной свиты на суше. ССТ1 – верхний неоплейстоцен (сартанское похолодание) – голоцен (послесартанское потепление - ингрессия моря), морские отложения различных фаций.

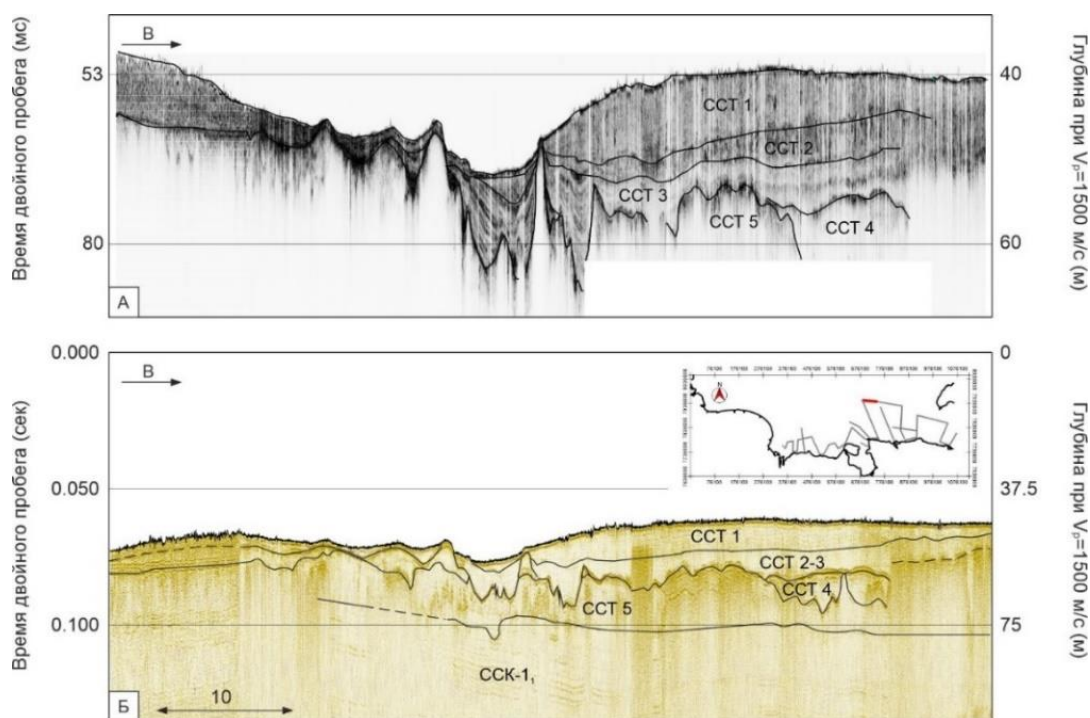


Рис. 2. Сейсмоакустический профиль 0066-1_10: А – временной разрез, полученный с использованием высокочастотного профилографа; Б – временной разрез, полученный с использованием электроискрового источника упругих колебаний (спаркер).
Хроностратиграфическая интерпретация ССТ – в тексте.

Палеогеографические реконструкции составленные для последних 24 кал.тыс. л.н. с учетом имеющихся данных об изменении уровня моря [Bauch et al., 2001] показали, что в конце позднего неоплейстоцена-начале голоцена прибрежные районы Восточно-Сибирского моря представляли собой сушу, на которой в ходе потепления развивались комплексные термоденудационные процессы, а осадконакопление происходило в континентальных условиях. Трансгрессия морских вод происходила с востока на запад, около 10 тыс. л.н. первые связанные с открытым морем лагуны образовались к западу от о-ва Врангеля; около 8,5 тыс.л.н. на западе Восточно-Сибирского моря массив суши простирался до современного о-ва Новая Сибирь, и существовал глубоко вдающийся в сторону суши ингрессионный залив на месте палеодолины Индигирки, в то время как весь остальной шельф был уже затоплен морем.

На основе макрофаунистических исследований и датирования раковин моллюсков, уточнены палеогеографические реконструкции для района палеодолины р. Индигирки для периода 11 - 6.5 кал.тыс.л.н. По данным геолого-геофизических исследований прибрежного шельфа Восточно-Сибирского моря было установлено, что мощность отложений, сформировавшихся на последнем этапе палеогеографического развития в ходе послесартанской морской трансгрессии в пределах палеодолины р. Индигирки, достигает 5–7 м. В бортах палеодолины, по данным НСАП, обнажаются отложения, прошедшие субэральную стадию развития в ходе сартанской регрессии. Колонки морских донных отложений фиксируют трансгрессивный тренд с постепенным удалением от источников сноса и повышением палеосолености. Доминирование мелководных видов микрофоссилий, характерных для внутреннего шельфа арктических морей, находящихся под сильным влиянием речного стока, указывает на условия, близкие к современным в течение последних 6.2 кал.тыс.лет (рис. 3). В то же время, некоторое возрастание количества материала ледового разноса вверх по разрезу колонки из палеодолины р. Индигирки, в сочетании с увеличением доли нормально морских видов микрофоссилий, позволяют предположить существование немного более мелководных обстановок с менее

суровым ледовым покровом до 3.5–4.5 кал.тыс.л.н., после чего условия стали более мористыми, а климат более прохладным. Скорость седиментации отложений варьировала от 51 см/тыс.лет в период 6.2–5.5 кал.тыс.л.н. до 13 см/тыс.лет в последние примерно 1800 кал.лет.



Рис. 3. Палеогеографические реконструкции района палеодолины р. Индигирки для различных временных срезов (с 11 до 6.5 кал.тыс.л.н.): А – Субаэральные условия (1 – место отбора грунтовой колонки 20ВСМ-8; 2 – изолинии погребенного субаэрального рельефа); Б – Начало бассейновой седиментации в палеозаливе; В – Постепенное отчленение о. Жохова от материковой части; Г – Образование архипелага Новосибирских островов (датировки показывают последние сухопутные фаунистические и археологические находки на островах)[Анисимов и др., 2002; 2009; Питулько, Павлова, 2015]; Д – Деградация островных территорий и формирование локальных палеопротоливов вокруг о. Новая Сибирь.

Благодарности

Авторы благодарят капитанов и экипажи НИС “Иван Киреев” и “Капитан Воронин”, специалистов Центральной лаборатории ВСЕГЕИ, Д.Г. Борисова (ИО РАН) за выполненные на высоком уровне лабораторные исследования, и д-ра Р.Ф. Шпильхагена (ГЕОМАР) за содействие в получении AMS14C датировок и плодотворные научные дискуссии.

Финансирование

Исследования выполнены при поддержке РФФ, проект 22-27-00412.

Список литературы:

1. Александрова Г.Н. Геологическое развитие Чаунской впадины (северо-восток России) в палеогене и неогене. Статья 1. Палеоген // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы, отд. геол. Т. 91. 2016. Вып. 4-5. С.148-164.
2. Анисимов М.А., Иванова В.В., Пушина З.В., Питулько В.В. Лагунные отложения острова Жохова: возраст, условия формирования и значение для палеогеографических реконструкций региона Новосибирских островов // Известия РАН. Серия географическая. 2009. № 5. С. 107–119.
3. Анисимов М.А., Тумской В.Е., Саватюгин Л.М. К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Известия Русского Географического общества. 2002. Т. 134. Вып. 5. С. 32–37.

4. Дударев О.В. и др. Новые данные о распределении глинистых минералов в донных осадках шельфа Восточно-Сибирского моря // Межд. Конф. «Полезные ископаемые континентальных шельфов» и V (заключительная) конференция по проекту IGC-P464 «Континентальные шельфы во время последнего гляциального цикла». СПб. 2005. С. 119-122.
5. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. Экологическое состояние и минералого-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 595–610.
6. Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Дударев О.В. Особенности минерального состава осадков шельфа восточной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирского // Океанология. 2013. Т.53. № 4. С. 529-538.
7. Питулько В.В., Павлова Е.Ю. Опыт радиоуглеродного датирования культуросодержащих отложений Жоховской стоянки (Новосибирские о-ва, Сибирская Арктика) // Записки Института истории материальной культуры. 2015. № 12. С. 27–55.
8. Семенов Ю.П. О некоторых особенностях формирования донных отложений Восточно-Сибирского и Чукотского морей // Антропогенный период в Арктике и Субарктике. Тр. НИИГА. Т. 143. М.: Недра. 1965. С. 350-352.
9. Яшин Д.С. Голоценовый седиментогенез Арктических морей России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. СПб.: ВНИИОкеангеология. 2000. Вып. 3. С. 57–67.
10. Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin// Glob. Planet. Change. 2001. V. 31. P. 125–139.

УДК 550.84.093.1

Рубрика 38.43.00; 38.47.19

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-КАРСКОГО ШЕЛЬФА И СРАВНЕНИЕ ЕЕ С БЛИЗЛЕЖАЩИМИ РЕГИОНАМИ

LITHOSTRATIGRAPHY OF QUATERNARY DEPOSITS OF THE NORTH KARA SHELF AND COMPARISON WITH NEARBY REGIONS

Рыбалко Александр Евменьевич^{1,2,3}, Токарев Михаил Юрьевич⁴, Полудеткина Елена Николаевна⁴, Пирогова Анастасия Сергеевна⁴, Потемка Андрей Константинович⁵, Аксенов Алексей Олегович², Кудинов Артем Анатольевич^{1,2}, Бирюк Мария Александровна², Терехина Яна Евгеньевна⁴, Замотина Злата Сергеевна⁴

¹ФГБУ «ВНИИОкеанология, Санкт-Петербург,

² Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург

³ЦМИ МГУ им М.В. Ломоносова, Москва

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова,

⁵ООО «Сплит»

Rybalko Alexander Evmenievich^{1,2,3}, Tokarev Mikhail Yurievich⁴, Poludetkina Elena Nikolaevna⁴, Pirogova Anastasia Sergeevna⁴, Potemka Andrey Konstantinovich⁵, Aksenov Alexey Olegovich², Kudinov Artem Anatolyevich^{1,2}, Biryuk Maria Aleksandrovna², Terekhina Yana Evgenievna⁴, Zamotina Zlata Sergeevna⁴

¹FGBU "VNIIOkeanologiya", St. Petersburg,

² Institute of Geosciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg,

³CMI MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow,

⁴MSU named after. M.V. Lomonosov,

⁵LLC "Split"

Введение

До недавнего времени стратиграфическое расчленение четвертичных отложений северной части Карского моря воспринималось как единое в пределах Баренцево-Карского шельфа или, по крайней мере, его северной части. Именно это зафиксировано как на «Карте четвертичных образований территории Российской Федерации», масштаба 1:2500000, так и на других региональных картографических продуктах. Однако, полученные материалы в ходе экспедиции ТТР-21 в северной части Карского моря и сравнение их с материалами прошлых экспедиций (ТТР-19 и ТТР-20), которые проходили в северной части уже Баренцевоморского шельфа, а также с многочисленными данными по четвертичной геологии Южно-Карского шельфа показывают, что в описываемом регионе палеогеографические события развивались по особому сценарию. В северной части Баренцевоморской платформы разрез четвертичных отложений ограничен по мощности, формировался в значительной части под влиянием последнего валдайского оледенения. При этом в голоцене здесь накопление осадков было сильно редуцировано, т.к аллювиальные

наносы сюда практически не достигают, нет и протяженных абразионных берегов. Отсюда преимущественно абразионный характер современной донной поверхности и широкое распространение мезоформ донного рельефа, связанных

как с активной фазой развития локальных ледниковых щитов, так и с пассивной стадией их деградации. На Северо-Карском же шельфе были выявлены наряду с абразионными поверхностями морского дна и зоны мощного осадконакопления, причем установленные мощности рыхлых осадков не оставляют сомнения, что накопление их началось, по крайней мере, в позднем неоплейстоцене. Охарактеризовать эти особенности четвертичного седиментогенеза и является основной задачей нашего доклада.

Обзор имеющихся данных по стратиграфии четвертичного чехла Северо-Карского шельфа

Стратиграфическая изученность четвертичных отложений Северо-Карского шельфа существенно уступает его центральной и южной частям, что определяется отсутствием здесь скважин неглубокого заложения. Основным источником информации о строении четвертичного покрова данные картирования двух листов Госгеолкаты-1000 (листы Т41-44 и Т45-48), причем на втором листе присутствуют только редкие данные геологического пробоотбора. В соответствии с этими данными наиболее древними отложениями в составе рыхлого чехла являются морские эоплейстоцен-среднеоплейстоценовые образования, залегающие непосредственно во впадинах на коренном цоколе. Они перекрываются отложениями ниже-среднеоплейстоценового возраста, которые формируют третий сеймостратиграфический комплекс, нигде не выходящий на поверхность морского дна. Наиболее древними опробованными отложениями являются казанцевские осадки (mIII), которые с определенной долей вероятности зафиксированы под покровом голоценовых отложений в интервале 175–190 м на площади листа Т45-48 на всем протяжении Северо-Карского шельфа и были представлены зеленовато-серым мягким алевропелитом, с незначительным количеством гидротроилита, визуалью мало отличным от вышележащих голоценовых отложений. Возраст рассматриваемых отложений был определен на основании находок моллюсков, спор и пыльцы, остракод и фораминифер [Качурина и др., 2013]. Особое положение занимают ледниковые отложения, которые были установлены как по данным прибрежного бурения у полуострова Таймыр, так и материалам сейсмоакустического профилирования в верховьях желоба Воронина. В первом случае они отнесены к моренам максимального оледенения, вероятно, самаровско-тазовского возраста (g-II), которые залегают на коренных породах и представлены валунными алевритами и глинами [Качурина и др., 2013]. Принципиально важно, что морены содержат тела погребенных глетчерных льдов, мощность их – 25–30 м. На шельфе ледниковые отложения зафиксированы по данным геологов Полярной экспедиции примерно на 88 градусе с.ш. и представляют выраженные в рельефе моренные тела с «хаотическим» характером сейсмосаписи. Они отнесены к сартанскому возрасту, что наиболее вероятно. Пространственно с ледниковыми отложениями связаны ледниково-морские отложения верхнего неоплейстоцена (mgIII4), которые выделяются на сейсмоакустических профилях на Северо-Карском шельфе по характерной караеобразной форме с крапчатой или неяснослоистой записью [Качурина и др., 2013].

Поверхностный горизонт рыхлых осадков представлен голоценовыми отложениями, которые, по данным геологов Полярной экспедиции, представлены ундулювиальными, нефелоидными и ледово-морскими осадками.

Методика работ и полученные результаты

В условиях отсутствия надежных буровых данных и ограниченного объема геологического пробоотбора основную роль в стратиграфическом (сейсмостратиграфическом) расчленении донных отложений играют сейсмоакустические методы. В рейсе ТТР-21 проводилось сейсмическое профилирование сверхвысокого разрешения по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОГТ). Регистрация упругих колебаний выполнялась с использованием 16-канальной сейсмокоды длиной 30 м с шагом между каналами (одиночными гидрофонами) 2 м. Возбуждение колебаний обеспечивалось электроискровым источником мощностью 3.5-4 кДж при 100 активных электродах. Рабочий диапазон частот при таких параметрах наблюдений составил от 100 до 450 Гц с центральной частотой около 220 Гц. Указанная методика наблюдений обеспечила глубинность исследований в первые десятки метров от дна при вертикальной разрешающей способности сейсмической записи 1-5 м. Было выполнено более 3000 пог. км сейсмопрофилей. Для получения записей с ультравысоким разрешением верхнего слоя донных осадков, чтобы совместить данные геофизических и геологических исследований было выполнено акустическое профилирование с использованием параметрического профилографа Parasound P70, встроенного в блистер НИС «Академик Борис Петров» в трехчастотном исполнении. Параметрические частоты, выбранные для работы профилографа, составляли 7 кГц (нижняя частота), 17.5 кГц (вспомогательная частота) и 42 кГц (верхняя вспомогательная частота). Глубинность АПр составила 10-20м от дна при вертикальной разрешающей способности 0.1-1 м (на нижней частоте).

Геологические наблюдения включали геологический пробоотбор с грунтовой прямооточной трубкой длиной 3м (иногда с наверху дополнительной секцией длина ее достигала 4,5м общим весом около 500 кг и внутренним диаметром 114,3мм. Это позволило использовать для отбора кернов пластиковые трубы диаметром 109 мм, что позволило получать слабо нарушенные керны и практически не деформировать их при доставании. Вкладыши сразу после отбора проб разрезались на две половины. Одна из них предназначалась для описания и литологических исследований, другая предназначалась для газогеохимических исследований.

Основные результаты

Проведенное на Северо-Карском шельфе сейсмическое высокоразрешающее профилирование показало, что близкий по характеру Северо-Баренцевоморскому шельфу рельеф, а также преимущественно денудационный разрез четвертичных отложений можно выделить только на Центрально-Карской возвышенности и, вероятно, на вдольбереговой платформе архипелага Северная Земля. К югу от этой возвышенности присутствуют два типа сейсмического разреза: мощная толща слоистых осадков (более 20м) и денудационный разрез с сокращенной мощностью рыхлых образований и с отчетливыми формами геокриологических образований. В первом случае четвертичные отложения имеют явно морской генезис. При этом повышенная плотность осадков с самого верха колонок указывает также на широкое развитие уже современного размыва, который исключает присутствие средне-верхних голоценовых осадков. Причем большая мощность этих отложений по данным сейсмике априори не позволяет весь разрез относить к голоцену, а предположение о развитии единого морского (ледниково-морского) разреза в том числе и в позднем неоплейстоцене достаточно однозначно свидетельствует об отсутствии в позднем сартане здесь ледника.

Об этом же говорит и присутствие криогенных форм рельефа в пределах развития второго типа сейсмического разреза, но в этом случае речь уже идет о континентальной фазе

развития этой территории на значительном отрезке голоцена, а морские условия здесь, как и на Восточно-Арктическом шельфе, а также в центре Карского моря между Новой Землей и

Ямалом установились в ходе развития гляциоэвстатической трансгрессии. В северной части изученной площади были установлены типичные ледниковые формы рельефа: гряды, обширные поля с характерным холмисто западным рельефом. В перигляциальной зоне были зафиксированы водно-ледниковые формы рельефа, в том числе озы. Это свидетельствует об ограниченном характере оледенения в северной части Карского моря. В тоже время анализ сейсмограмм предшествующих экспедиций показал, что типичные ледниковые гряды были зафиксированы на западном склоне желоба Воронина, причем их форма однозначно говорит о приходе ледника с востока, т.е со стороны Северной земли.

Одной из основных особенностей Северо-Карского шельфа является наличие широко разветвленной системы долин. Одна из них открывается в желоб Воронина, а другая направлена в сторону пролива Вилькицкого. Многие из этих долин имеют все черты переуглубления, а рельеф днища их характеризуется следами мощных денудационных процессов. Современное осадконакопление в них практически не наблюдается, за исключением борозд и западин, в которых были отобраны голоценовые осадки. Долины выходят непосредственно к Центрально-Карскому желобу. Глубина этих долин колеблется от 30 до 75м, а глубина врезания в более древние породы может колебаться от 100 до 200 м.

Заключение

Полученные данные позволяют предположить сложное и гетерогенное строение чехла четвертичных отложений. В скрытом колонками разрезе это, вероятно, отложения верхнего неоплейстоцена (МИС 5e), представленные морскими осадками. При этом в других районах Северо-Карского шельфа (на Северо-Карской возвышенности) не были вскрыты отложения древнее верхнего сартана (МИС 2), представленные позднеледниковыми (слоистые глины) отложениями, в том числе и ледникового происхождения. Отложения голоценового возраста полифацциальны. Это морские отложения, в том числе связанные с затоплением континентальных территорий с многолетними мерзлыми породами и хорошо развитой речной системой (затопленные палеодолины). Насущной задачей является определение точного положения ледникового покрова и центра позднесартанского оледенения (частично выполнено в рамках ТТН21) и морского (приледникового бассейна).

Список литературы:

1. Качурина Н. В., Макарьев А. А., Макарьева Е. М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серии Северо-Карско-Баренцевоморская и Таймырско-Североземельская. Лист Т-45-48 – м. Челюскин. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013, 568 с.

УДК 551.46

Рубрика 38.47.00

ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПИНГОПОДОБНЫХ ФОРМ МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ ПЕЧОРСКОГО МОРЯ

GEOMORPHOLOGICAL STRUCTURE OF PINGO-LIKE FEATURES OF SHALLOW PART OF PECHORA SEA

**Кохан Андрей Валерьевич¹, Мороз Евгений Андреевич¹, Денисова Анна Павловна¹,
Сухих Елена Александровна¹, Еременко Екатерина Андреевна^{1,2}**

¹*Геологический Институт РАН, Москва,*

²*МГУ им. М.В.Ломоносова, Географический факультет, Москва*

**Kokhan Andrei Valerievich¹, Moroz Evgeny Andreevich¹, Denisova Anna Pavlovna¹,
Sukhih Elena Aleksandrovna¹, Eremenko Ekaterina Andreevna^{1,2}**

¹*Geological Institute of RAS, Moscow,*

²*MSU, Faculty of Geography, Moscow*

Введение

Подводные пингоподобные формы (pingo-like features, PLF/ППФ) представляют собой малоизученный геолого-геоморфологический феномен. В ходе работ по научным программам 49-го, рейса НИС «Академик Николай Страхов» в 2020 г. и 51-го рейса НИС «Академик Борис Петров» в 2022 г. был обследован полигон в мелководной части Печорского моря, где развиты такие формы. Работы на полигоне включали многолучевое эхолотирование, сейсмоакустическое профилирование акустическим профилографом и источником спаркер.

Целью исследования был анализ строения рельефа дна и верхней части осадочного чехла на основании цифровой модели рельефа дна (ЦМР) в разрешении 10x10 м и сейсмоакустических данных. По результатам работ были сформированы предварительные представления о геоморфологическом строении полигона работ.

Данные и методы

Работа основывается на батиметрических и сейсмических данных полученных многолучевым эхолотом SeaBat 8111, профилографом EdgeTech 3300 (на НИС «Академик Николай Страхов») и многолучевым эхолотом Reason T-50 ER, профилографом Parasound P70 (на НИС «Академик Борис Петров») и системой непрерывного сеймопрофилирования. Съёмка была выполнена на полигоне в восточной части Печорского моря с глубинами 30-53 м. Методика сбора и обработки данных описана в работе [Кохан и др., 2023]. Многолучевой эхолот обеспечил практически 100% покрытие полигонов в выбранном разрешении, тогда как сеймопрофилирование дало информацию о газопроявлениях только на профилях, отстоящих друг от друга на расстоянии от 50 до 250-300 м в зависимости от использованного многолучевого эхолота.

Опубликованные сведения о геолого-геоморфологическом строении полигонов работ

По имеющимся опубликованным сведениям, ранее работы на обследованном полигоне не выполнялись. На расстоянии порядка 7 км к северо-западу располагается полигон «Диапиры», обследованный в ходе работ АМИГЭ в 1988 и 1995 гг. [Бондарев и др., 2002]. В 2018-2020 гг. по программе 38-го и 41-го рейсов НИС «Академик Николай Страхов» на этом полигоне была проведена детальная съемка, результаты анализа геолого-геоморфологического строения полигона по полученным в ходе этих работ ЦМР и сейсмоакустическим данным представлены в работе [Кохан и др., 2023].

Результаты работ

Полигон располагается в пределах позднеплейстоцен-голоценовой аккумулятивно-абразионной равнины (глубины менее 50-55 м) восточной части Печорского моря на расстоянии порядка 45 км к северо-западу от о. Матвеев и 50 км к западу от о. Вайгач. Полигон занимает осевую часть пологосклонного ложбинообразного понижения субмеридионального простираения шириной по бровкам 20-25 км, протягивающегося в южном направлении к береговой линии. Глубины в границах полигона изменяются от 31 до 52 м. В центральной части полигона располагается тальвег понижения с глубинами от 42-35 до 52 м, возрастающими в северном направлении, на флангах полигона располагаются участки склонов ложбинообразного понижения с глубинами дна до 35-37 м (Рисунок А).

По результатам высокочастотного акустического профилирования на полигоне выявлены три сеймостратиграфических комплекса (ССК), согласующиеся со схемой стратиграфии полигона «Диапиры», предложенной в работе [Бондарев и др., 2002].

С поверхности залегает ССК I (Рисунок, Б) с хаотической высокоамплитудной записью мощностью от первых метров до 10-11 м. Отложения ССК I ассоциируются с голоценовыми и/или позднеплейстоценовыми (сартанскими) морскими илами, глинами и суглинками ($mQ_3^4-Q^4$).

Под плащеобразным покровом ССК I или на поверхности дна на участках размыва ССК I залегают отложения акустически слоистого ССК II сложно отслеживаемой мощности. Там, где под отложения ССК II прослеживается кровля ССК III его мощность изменяется от первых метров до 5-10 и до 20-25 м. Отложения ССК II ассоциируются с аллювиально-морскими позднеплейстоценовыми (сартанскими) песками и суглинками (amQ_3^4). На большей части территории освещение разреза ССК II минимально из-за широкого развития газонасыщения разреза либо, по-видимому, песчанистого и/или мерзлого характера отложения. Акустический сигнал проникает в отложения комплекса на небольших участках на максимальную глубину до 25-30 м от поверхности дна.

В нижней части освещенного сейсмоакустическим профилированием разреза залегают отложения ССК III (Рисунок, В). Они выступают акустическим фундаментом и блокируют проникновение акустического сигнала. Кровля ССК III трассируется на отдельных участках и представляет собой сложно построенную систему отражений различной геометрии со сложным рельефом. На разрезах акустического профилографа кровля ССК III залегает на глубинах от первых метров до 25-29 м от поверхности дна. Данные бурения на полигоне «Диапиры» [Бондарев и др., 2002] показывают, что на отдельных участках кровля ССК III может быть приурочена как к кровле казанцевской толщи (mQ_3^{1-3}), так и к участкам скопления газа в зрянских песках (aQ_3^4).

В рельефе полигона выделяется 70 ППФ (Рисунок, А) высотой от 1-2 до 12-14 м, в основном от 4 до 10 м. Ширина ППФ изменяется 30-40 до 120-135 м, в основном составляя 50-80 м.

Длина изменяется от 45-50 м до 120-130 м, в основном составляя 60-90 м. Крутизна склонов ППФ не превышает 20-25, в основном составляя 10-15 градусов. На участке зафиксировано 162 акустических аномалии в водной толще представленные образованиями типа «факел». Из 70 ППФ съемочными профилями пересекается 23 формы, из них на 17 ППФ (74%) зафиксированы акустические аномалии в водной толще.

Для ППФ полигона, в отличие от аналогичных форм полигона «Диапиры» не характерны округлые компенсационные впадины полностью окружающие ППФ. На изученном полигоне наблюдаются удлиненные впадины к северу и северо-востоку от ППФ. Их длина составляет от 50-70 до 200-220 м, относительная глубина - до 2-3 м. Характерно, что длинные оси ППФ ориентированы субперпендикулярно простиранию впадин. Впадины ориентируются в северном и северо-восточном направлении (Рисунок). К югу от ППФ отмечаются сnivelированные накоплением отложений ССКІ впадины.

На основании полученных ЦМР и разрезов сейсмопрофилирования на полигоне можно выделить морфоскульптурные элементы следующих типов (Рисунок, Г):

1. Тип 1, аккумулятивные тела типа контуритов выраженные в рельефе дна пологими поднятиями с мощностью отложений ССКІ до 4-6 м, облекающие поднятия кровли ССКІІ или залегающие на выровненной поверхности отложений ССКІІ.
2. Тип 2а, сnivelированные осадконакоплением впадины, не выраженные в современном рельефе дна, заполненные отложениями ССКІ мощностью от 2-4 до 8-11 м.
3. Тип 2б, впадины, выраженные в современном рельефе дна относительной глубиной до 4-5 м, заполненные отложениями ССКІ мощностью до 8-11 м, в их пределах отмечаются предположительно формирующиеся ППФ в форме поднятий кровли ССКІІ и ІІІ, для этих впадин характерны высокие плотности газопроявлений.
4. Тип 3, слабовыраженные в рельефе валообразные поднятия сложенные отложениями ССКІІ, либо обнажающимися на поверхности дна, либо перекрытыми маломощными (менее 2 м) линзами отложений ССКІ, к поднятиям приурочены скопления ППФ и участки высокой плотности газопроявлений.

Заключение

Рельеф дна полигона представляет собой результат взаимодействия процессов течениевого размыва и аккумуляции с одной стороны и флюидогенных (и в том числе, возможно мерзлотных) процессов с другой стороны. Первые приводят к накоплению аккумулятивных тел по всему полигону, общей нивелировки реликтового доголоценового рельефа и размыву с подветренной стороны ППФ на участках удлиненных впадинах (общее направление течения с юго-юго-запада). Часть материала откладывается с флангов ППФ, что приводит к удлинению в субперпендикулярном простиранию удлиненных впадин направлению. Таким образом, ППФ полигона, по-видимому, являются комплексными формами, частично сложенными осадками ССКІ благодаря течениевым процессам, частично – отложениями ССКІІІ благодаря флюидогенным процессам. Древние доголоценовые впадины типа 2а нивелированы осадконакоплением, в их границах активные рельефообразующие процессы прекратились или затухают. Впадины типа 2б представляют собой активные формы, чье проседание не компенсируется осадконакоплением, в их пределах идет активная дегазация, а на флангах формируются воздымающиеся поднятия отложений ССКІІ с частично или полностью эродированными отложениями ССКІ и со скоплениями ППФ. Для участка в южной части полигона с развитием этих форм характерна максимальная плотность газопроявлений (Рисунок), по-видимому, на этом участке активно идут флюидогенные процессы с изменением рельефа дна. Мы предполагаем, что формы рельефа дна обследованного полигона представляют собой активные образования, иначе они были бы сnivelированы течениевыми процессами. Работа поддержана грантом РНФ № 22-77-10091.

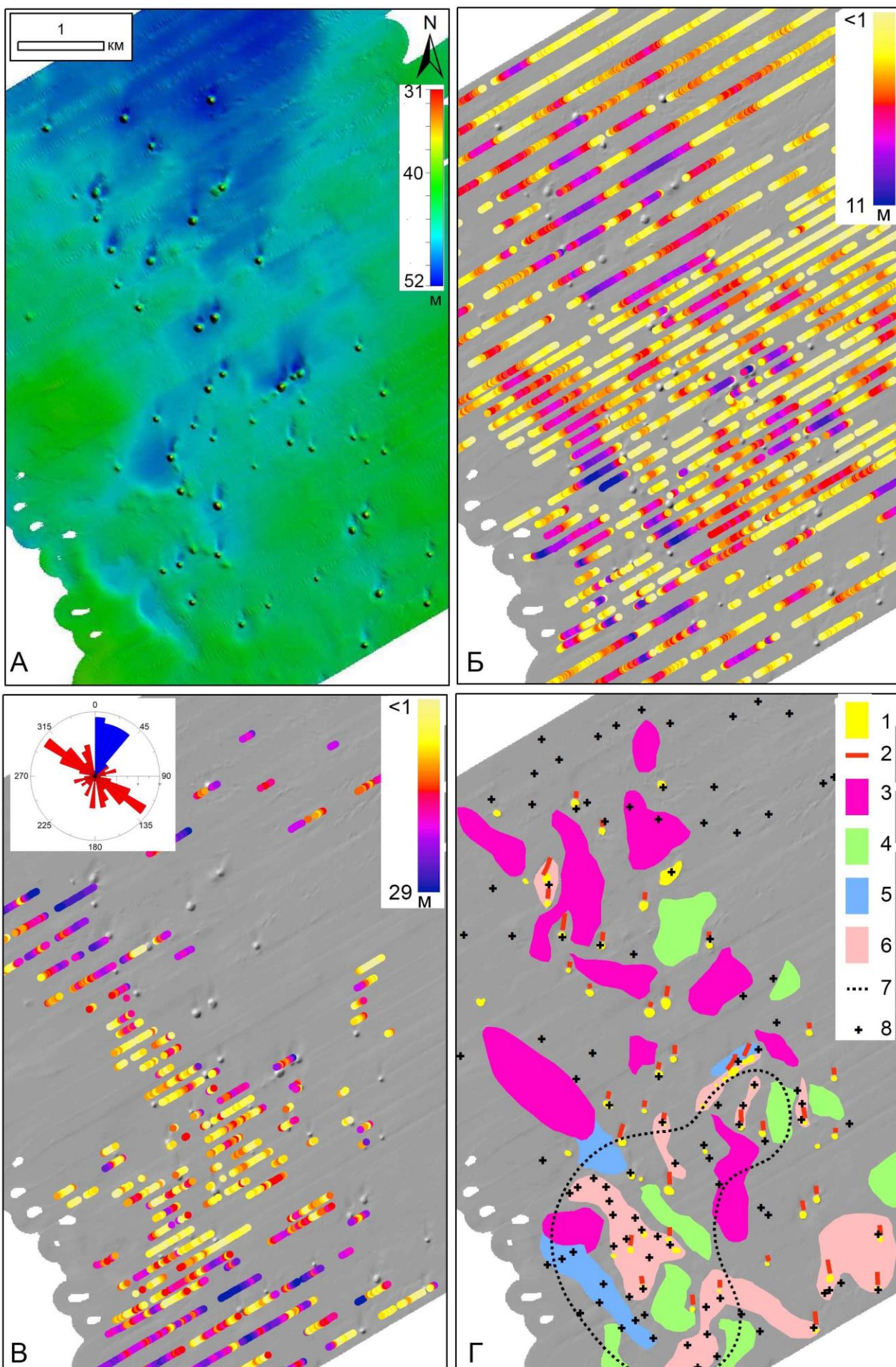


Рисунок. А - рельеф дна полигона. Б – глубина залегания подошвы отложений ССКИ, В – глубина залегания кровли отложений ССКШ, во врезке показаны ориентировки длинных осей ППФ (красным) и удлинённых впадин (синим) Г – схема элементов рельефа дна полигона.

Цифрами на рисунке обозначены: 1 – ППФ, 2 – оси удлинённых впадин, 3 – аккумулятивные тела типа 1, 4 – снивелированные осадконакоплением впадины типа 2а, 5 – выраженные в рельефе впадины типа 2б, 6 - валообразные поднятия типа 3, 7 – область с максимальной плотностью газопроявлений, 8 -газопроявления.

Список литературы

1. Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 7. – С. 587–598.
2. Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П., Ананьев Р.А., Сухих Е.А., Никифоров С.Л., Соколов С.Ю., Разумовский А.А. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 110–130

УДК 551.89

Рубрика 38.57.23

ОБНАРУЖЕНИЕ ПОДВОДНОГО РУСЛА ПРА-ПЕЧОРЫ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ СТАНДАРТНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ 3D

DISCOVERY OF THE UNDERWATER CHANNEL OF THE PALEO-PECHORA BASED ON SPECIALIZED INTERPRETATION OF STANDARD 3D SEISMIC DATA

Соловьева Марина Андреевна¹, Терёхина Яна Евгеньевна¹, Хлебникова Оксана Александровна¹, Горбачев Сергей Викторович², Нурмухамедов Тимур Ваисович²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

² ООО "РН-Шельф-Арктика", Москва

Solovyeva Marina Andreevna¹, Terekhina Yana Evgenievna, Khlebnikova Oxana Aleksandrovna¹, Gorbachev Sergey Viktorovich², Nurmukhamedov Timur Vaisovich²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² LLC "RN-Shelf-Arktika", Moscow

Введение

В настоящее время Арктический шельф представляет собой район повышенного интереса как с практической точки зрения, характеризуясь высоким нефтегазоносным потенциалом, так и с фундаментально-научной, являясь ключом к палеоклиматическим реконструкциям четвертичного периода. Сложность и большая стоимость проведения морских сейсморазведочных работ в арктических широтах требует разработки новых подходов к методике как полевых исследований, так и камеральной интерпретации данных. В связи с этим, возрастает актуальность оптимизации комплекса геолого-геофизических исследований путём использования материалов сейсморазведочных работ с целью предварительного выявления опасностей для размещения нефтегазопромысловых сооружений и более обоснованного выбора площади для последующих инженерно-геологических изысканий.

Объектом исследования является один из лицензионных участков в Печорском море. Исследуемый участок покрыт съёмками стандартной сейсморазведки 2D и 3D с донным и буксируемым оборудованием, а также в пределах него выполнены несколько площадок инженерных изысканий. Стандартные методы обработки и интерпретации низкочастотных данных нефтяной сейсморазведки накладывают существенные ограничения на возможности изучения придонного интервала разреза [Terekhina, 2014]. В связи с этим был разработан и применён специализированный граф обработки, нацеленный на сохранение и выделение информации в первых сотнях метров ниже морского дна [Terekhina, 2016].

Результаты

На пяти структурах, отработанных методикой стандартной сейсморазведки 3D, в результате специализированной переобработки данных были получены высокоразрешающие сейсмические кубы и наборы карт атрибутов, рассчитанных по сейсмограммам.

Сейсмические разрезы оказались не достаточно информативны для изучения придонного интервала разреза (до 100 м ниже уровня дна), поэтому изучение территории велось по слайсам и картам атрибутов, которые показали высокий потенциал при поиске и картировании проявлений опасных геологических процессов, в том числе, палео-врезов [Solovyeva et al., 2021]. На картах атрибутов отчётливо выделяется сеть извилистых аномалий разной ширины, которые характеризуются пониженными значениями среднеквадратичных амплитуд, повышенными значениями атрибута "поверхностно-согласованные амплитудные поправки" (Рис. 1) и сложным распределением частотных атрибутов. Совокупность данных признаков, а также сопоставление с высокоразрешающими разрезами инженерно-геологических исследований, позволяет уверенно интерпретировать данные объекты как палео-врезы. Контуры аномальных участков прослеживаются по резкому изменению значений атрибута "ширина спектра", которое, по всей видимости, вызвано уменьшением мощности отложений, заполняющих врезы на их краях.

Также были обнаружены крупные области, характеризующиеся теми же особенностями распределения значений атрибутов и расположенные на окончаниях палео-врезов. Возможно, данные объекты являются погребёнными лопастями конусов выноса.

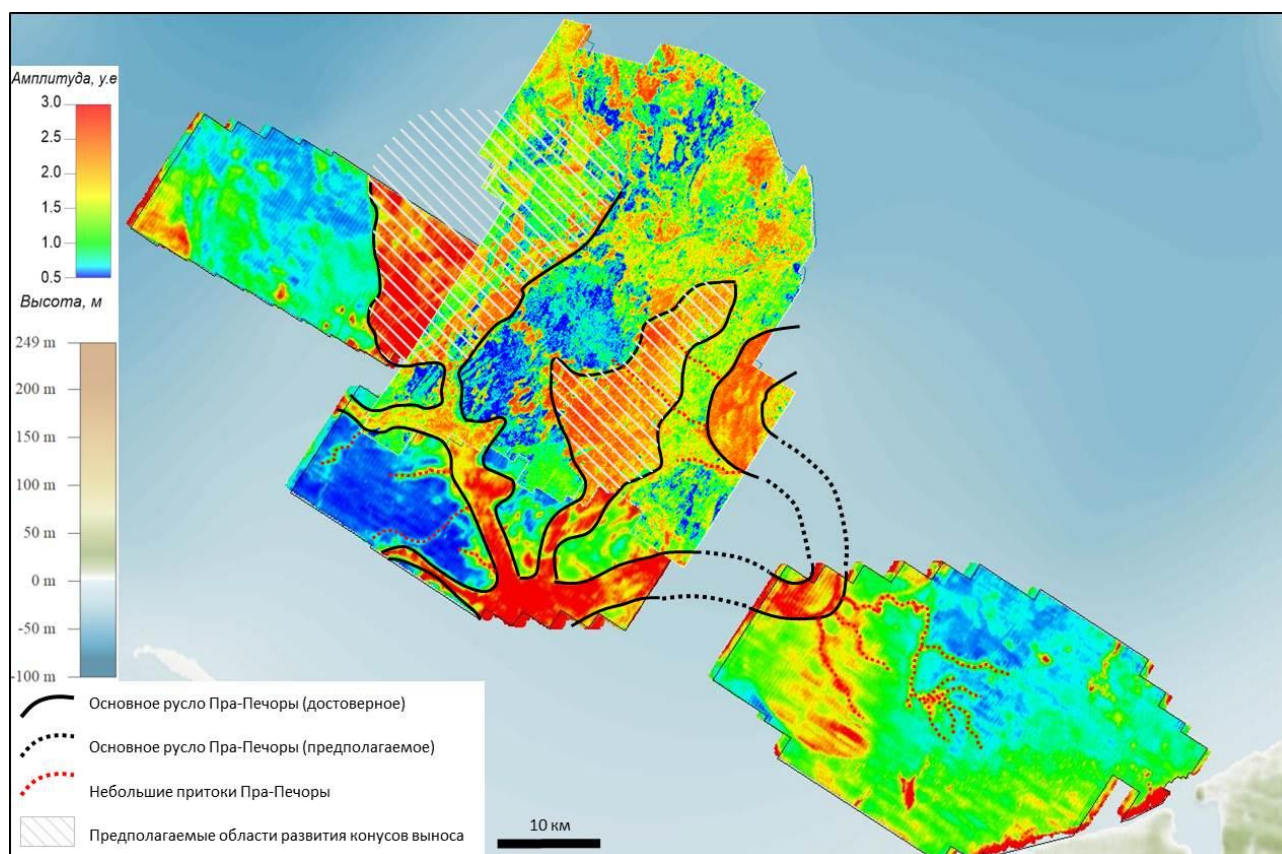


Рис. 1. Элементы речной сети Пра-Печоры на карте атрибута "поверхностно-согласованные амплитудные поправки", рассчитанного по данным 3D

Частотно-временные трансформанты позволили получить дополнительную информацию о мощности врезов и/или глубине их залегания в различных частях исследуемой площади. В низком частотном диапазоне проявляются наиболее крупные аномалии в южной части исследуемой площади, в то время как на высоких частотах проявляется сеть палео-врезов к северу (Рис. 2).

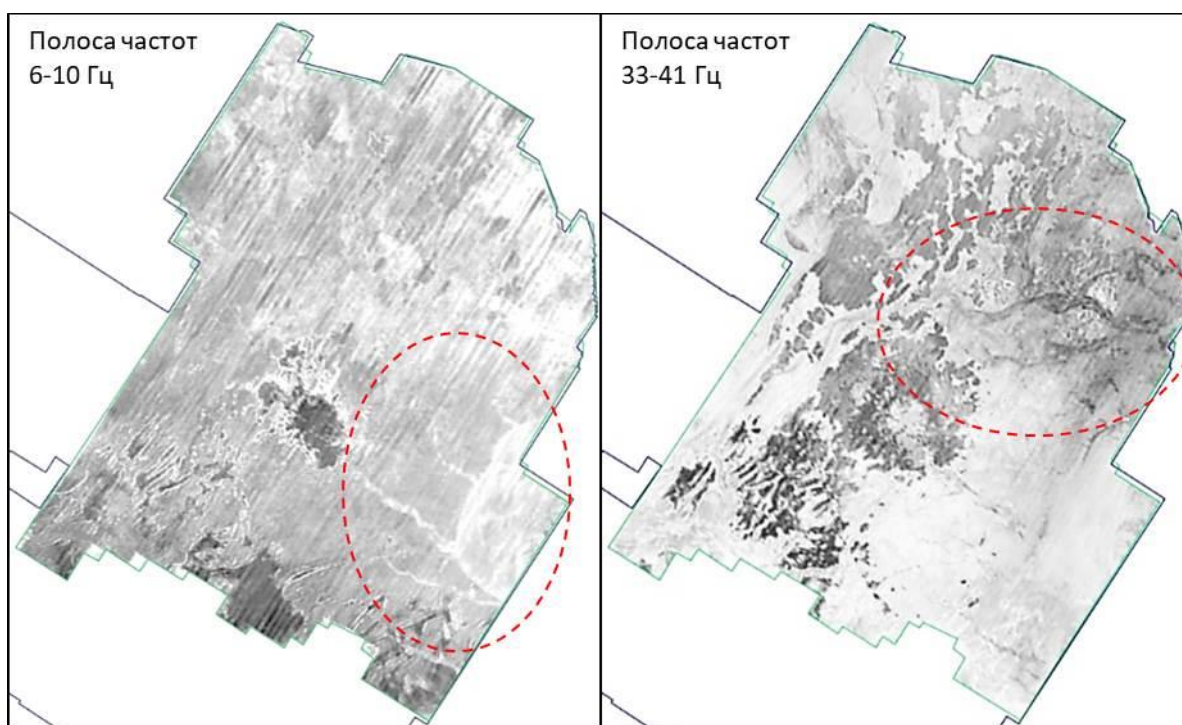


Рис. 2. Проявление разных сетей палео-каналов в различных диапазонах частот (горизонтальные слайсы на уровне 70 мс)

Продолжая успешный опыт выполнения инверсии по поверхностным волнам данных MASW на акватории Печорского моря [Титов и др., 2021], на некоторых участках исследуемой площади были проведены подобные работы, результаты которых показали существенное снижение скорости поперечных волн в пределах палео-врезов. Данный факт позволяет предполагать отличие в литологическом составе отложений, заполняющих палео-врезы, от вмещающих пород, а также их повышенную газонасыщенность.

Обнаруженная сложная сеть палео-врезов и погребённых конусов выноса, по всей видимости, является частью Пра-Печоры. Сложная форма палео-врезов, различия в их мощности и глубине залегания, а также наложение в плане выделенных объектов позволяет судить о длительном и сложном развитии русловой системы с неоднократной перестройкой во время периодических регрессий и трансгрессий Печорского моря.

Заключение

Применение новейших методов обработки и интерпретации сейсмических данных, включающих расчет амплитудных и частотных атрибутов по несуммированным данным, частотно-временные трансформанты, а также привлечение архивных инженерно-геофизических данных позволило обнаружить и закартировать в верхней части разреза крупную разветвлённую сеть погребённых палео-русел Пра-Печоры. Особенности её морфологии и внутреннего строения свидетельствуют о неоднократном изменении базиса эрозии и периодической перестройки русловой системы вследствие колебаний уровня моря, что вносит неоценимый вклад в уточнение существующих палеореконструкций данного региона в четвертичном периоде.

Региональные исследования такого масштаба по изучению строения верхней части разреза Печорского моря, в целом, и картирования русла Пра-Печоры, в частности, выполнены впервые.

Список литературы:

1. Титов Н.О., Токарев М.Ю., Горбачев С.В. Анализ поверхностных волн для идентификации опасных геологических процессов по данным трехмерных сейсмических наблюдений на шельфе Печорского моря // Геофизика. 2021. № 6. С. 120–125.
2. Solovyeva M.A., Terekhina Y.E., Khlebnikova O.A., Tokarev M.Yu, Gorbachev S.V., Nurmukhamedov T.V., Myatchin O.M. Approach to Geohazard Assessment Based on 2D/3D Seismic Data on The Pechora Sea Shelf. In Engineering and Mining Geophysics 2021, EAGE Publications, 2021
3. Terekhina Y.E., Tokarev M.Y., Pirogova A.S., Roslyakov A.G., Shalaeva N.V., Semenova A.A. Approach to 3D seismic data interpretation for drilling geohazard assessment. In Near Surface Geoscience 2015, EAGE Publications, 2014.
4. Terekhina Y.E., Gorbachev S.V., Maev P.A., Ponimaskin A.I. A possibility of using standard 3D seismic data for assessment of drilling geohazards in transit zone. In Near Surface Geoscience 2016 - Second Applied Shallow Marine Geophysics Conference. EAGE Publications, 2016.

УДК 551.462.32

Рубрика 38.47.00

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМОРФОЛОГИИ ДНА ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА И ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТИРОВАНИЯ И НЕПРЕРЫВНОГО СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

FEATURES OF GEOMORPHOLOGY OF THE BOTTOM OF THE EASTERN PART OF GULF OF FINNISH AND GEOLOGICAL STRUCTURE ACCORDING TO THE RESULTS OF MULTI-BEAM ECHO SOUNDING AND SUB-BOTTOM PROFILING

Сергеев Александр Юрьевич¹, Буданов Леонид Михайлович¹, Жамойда Владимир Александрович¹, Ковалева Ольга Анатольевна¹, Рябчук Дарья Владимировна¹, Дорохов Дмитрий Владимирович²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург*

² *Атлантическое отделение Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (АО ИО РАН), Калининград*

Sergeev Alexander Yurjevich¹, Budanov Leonid Mikhailovich¹, Zhamoida Vladimir Aleksandrovich¹, Kovaleva Olga Anatolyevna¹, Ryabchuk Daria Vladimirovna¹, Dorokhov Dmitry Vladimirovich²

¹ *A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint-Petersburg*

² *Atlantic Branch of the IO RAS, Kaliningrad*

Введение

По результатам экспедиционных исследований в восточной части Финского залива (северо-восток Балтийского моря), проводившихся в 53-м рейсе НИС «Академик Борис Петров» АО ИО РАН с участием ВСЕГЕИ в 2023 г. были получены новые данные многолучевого эхолотирования (МЛЭ) и высокоразрешающего непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП) на двух участках в районе о. Гогланд и в районе Выборгского залива. Также в ходе полевых работ ВСЕГЕИ 2023 г. были получены новые данные НСАП на выполненной ранее площадке многолучевого эхолотирования в районе Копорской Губы.

Несмотря на долгую историю морских геологических исследований Финского залива, до сих пор остаются важные нерешенные проблемы особенностей геологического строения, геоморфологии и истории геологического развития. К таким вопросам относятся расположение конечно-моренных форм рельефа, возраст дегляциации и скорость отступления ледникового фронта, спуск вод Балтийского ледникового озера, количество голоценовых колебаний уровня моря, амплитуда относительных регрессий и скоростей седиментации [Virtasalo et al., 2014; Рябчук и др., 2020; Рябчук и др., 2022; Сергеев и др., 2022].

Методы исследований

Экспедиционные работы проводились в 53-м рейсе НИС «Академик Борис Петров». В ходе экспедиции геофизическая съемка выполнялась непрерывно на ходу судна на полигонах и переходах. При работе на детальных полигонах и профилях измерения выполнялись на скорости 6-7 узлов. Одновременно на ходу судна выполнялась многолучевая эхолотная съемка (МЛЭ), высокоразрешающее сейсмоакустическое профилирование (ВСАП) и измерение вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) для корректного расчета глубин. Межгалсовое расстояние на акустических полигонах выбиралось таким образом, чтобы район исследования покрывался батиметрическими данными не менее чем на 120%. Съемка выполнялась в проекции UTM 34N (WGS-84). По мозаике обратного рассеяния МЛЭ выбирались точки для ее литологической интерпретации, где проводился отбор проб поверхностных осадков дночерпателем Ван Вина на станциях.

Многолучевая эхолотная съемка (МЛЭ) выполнялась штатным судовым эхолотом Reason SeaBat T50 Extended Range. Частота акустического сигнала настраивалась в диапазоне 150-420 кГц, но в основном для достижения максимального разрешения использовалась частота 420 кГц. Поперечная и продольная ширина луча составляла около 0,5°, максимальное количество лучей – 1024, ширина сектора – до 165°, максимальная ширина полосы обзора – до 900 м (в зависимости от режима работы). В ходе экспедиции была выполнена калибровка угловых несогласий МЛЭ посредством проведения стандартной процедуры (Patch Test).

Для корректного вычисления глубин на ходу судна в режиме свободного падения с помощью специальной лебедки, разработанной в АО ИО РАН [Рака V.T. et al., 2019], проводилось измерение вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) в водной толще с использованием зонда Valeport miniSVP 600 BAR (точность определения скорости звука – $\pm 0,02$ м/с).

Регистрация и обработка данных МЛЭ выполнялись с использованием программного обеспечения PDS-2000. Обработка данных включала в себя: применение уточненных данных измерений вертикальных перемещений судна (delayed heave), применение наиболее подходящих ВРСЗ, автоматическая и ручная фильтрация данных, построение цифровых моделей рельефа и моделей стандартных отклонений, проверка участков с высокими значениями стандартных отклонений на предмет выбросов и, при необходимости, дополнительная фильтрация и повторное перестроение ЦМР, экспорт данных в формат GeoTIFF и XYZ.

Высокоразрешающее непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП) донных осадков выполнялось разными профилографами в открытой части Финского залива и в Копорской Губе.

В открытой части Финского залива работы выполнялись с использованием штатного судового параметрического профилографа НИС «Академик Борис Петров» Atlas Parasound P70. Вертикальное разрешение профиля составляло около 15 см. Первичная высокая частота выставлялась около 20 кГц, а параметрическая низкая – в диапазоне 4,5-7 кГц в зависимости от типа грунта. Ширина луча профилографа – 4,5°. Регистрация данных выполнялась в программе Atlas Parastore в собственном формате профилографа ASD, и параллельно область окна эхограммы записывалась в формате SEG-Y. Одновременно регистрировались первичный высокочастотный сигнал и вторичный низкочастотный параметрический сигнал.

В Копорской Губе при выполнении геофизической съемки применялся параметрический профилограф SES-2000 compact (производство Innomar, Германия). В состав аппаратного комплекса входят: электронный блок управления, приемно-передающая антенна с кабелем, штанга-крепление к борту судна и ноутбук с установленным специализированным программным обеспечением (SESWIN). Антенна поочередно испускает низкочастотные (НЧ - 2-22 кГц, параметры сигнала выбирает оператор в SESWIN) и высокочастотные (ВЧ - 100 кГц)

зондирующие сигналы. При работе использовалась рабочая частота 10 кГц, что обеспечило разрешающую способность до 5 см. Число зондирований в секунду зависит от используемых параметров съемки (частота сигнала, длина записи, задержка и др.) и составляло до 50 раз в секунду.

Во время съемки антенна, жестко закрепленная на борту судна, буксируется на глубине около 70 см. Запуск источника и начало записи осуществляется оператором на ноутбуке через цифровой блок управления. На экране компьютера в реальном времени отображается каждая новая трасса НЧ и ВЧ зондирований, последовательности которых формируют временные сейсмоакустические разрезы, в первом случае они отражают внутреннее строение геологического разреза. Во втором – детальный рельеф морского дна по линии профиля. Также на экране отображается вспомогательная информация: номера трасс, время записи, координаты по данным GPS приемника, значения задержки и т.д. Скорость передвижения судна по профилю составляла около до 10 км/час.

Позиционирование съемки МЛЭ и профилографа осуществлялось с использованием интегрированной системы позиционирования Applanix POS MV, в которую входит GPS, курсоуказатель и датчик перемещений. Точность определения координат находилась в пределах 0,25–1,5 м, горизонтальных перемещений – 0,05°, вертикальных перемещений – 0,05 м.

Камеральная обработка сейсмоакустических данных проводилась в программах SESConvert (Innomar, Германия) и RadExPro (ООО «Деко–геофизика СК», Россия). Первый этап обработки данных – экспорт записей из внутреннего формата SES-2000 (.RAW) в формат SEG-Y для дальнейшей обработки. Следующий шаг – импорт записей в среду программы RadExPro. Ввод всех профилей НСП осуществляется единым образом с помощью модуля «SEG-Y Input». Расчет геометрии записи осуществлялся модулями «Trace Header Math» (пересчет в прямоугольные координаты) и «Compute Line Length» (расчет длины профиля для каждой трассы). X-интерполяция (приведение к единому шагу между трассами и нормализация на скорость судна) осуществлялась по рассчитанной длине профиля в модуле «Spatial Interpolation».

Обработка сигналов включала модули «Bandpass Filtering», «2D Spatial Filtering», «Burst Noise Removal» и «Hilbert Transform». С их помощью была применена частотная фильтрация к каждой входной трассе полосовым фильтром Ормсби, выполнены низкочастотная и высокочастотная горизонтальная фильтрация, удалены «прострелы» и построены огибающие. Параметры перечисленных модулей подбирались индивидуально для каждого профиля, а результат контролировался в модуле визуализации временного разреза «Screen Display». Измененные наборы трасс сохранялись для дальнейших манипуляций.

Завершающий этап обработки сейсмограмм – экспорт данных в формате Seg-y для использования в интерпретационных программных пакетах. Экспорт временных разрезов осуществлялся модулем «SEG-Y output», параметры выходного файла: формат отсчетов файла – I4, порядок байтов – нормальный.

Интерпретация обработанных сейсмограмм осуществляется в программе Kingdom SMT. Записи визуализируются в удобном для интерпретатора формате, интерпретируемые границы трассировались вручную стандартными средствами программы. Границы выделяемых на записи зон могут быть представлены протяжёнными осями синфазности или границами на которых изменяется инфраструктура записи и при трассировке сохраняются в проекте. Интерпретационный пакет позволяет в случае наличия пресечений линий наблюдений строить сводные разрезы на основе данных нескольких профилей, что обеспечивает наиболее надежную корреляцию границ на значительных расстояниях.

В проект программы были импортированы все имеющиеся временные разрезы, необходимые подложки (топографическая основа, цифровые модели рельефа для ключевых участков), доступные станции донного пробоотбора и скважины. При геологической интерпретации выделенных сейсмолещ и границ между ними учитывались все имеющиеся данные.

Результаты

Особенность работы заключалась в комбинации геофизических методов, а именно съемка многолучевым эхолотом, позволившая получить модель рельефа дна высокого разрешения, и съемка бекскаттером, отражающая степень рассеивания энергии и тем самым маркируя различия в составе донных отложений. На каждом из участков в 2023 г. было выполнено 6 станций донного пробоотбора на геоморфологически различных участках дна в пределах площадок. На участке «Выборгский» выполнено 204 пог. км НСАП, на участке «Гогланд» – 150 пог. км, на участке «Копорский» – 75 пог.км.

На акустических записях в ходе интерпретации временных разрезов выделены сейсмостратиграфические толщи (ССТ), ограниченные отражающими горизонтами (ОГ). Помимо ОГ между ССТ выделены также зоны их выхода на современную поверхность морского дна для дальнейшего площадного картирования. Трассированные ОГ и зоны выходов были экспортированы в ГИС (ArcMap) в виде набора точек с трехмерными координатами. С использованием инструмента “Toro to raster” для всех ОГ была выполнена интерполяция – получены цифровые модели поверхностей разных ОГ представляют собой трехмерную пространственную геологическую модель и позволяют проводить реконструкцию осадконакопления на каждом участке. Установленные ССТ были соотнесены со сейсмостратиграфической схемой, разработанной ВСЕГЕИ, и отражающей возраст и генезис выделяемых подразделений.

В ходе полевых работ по объекту по данным сейсмоакустического профилирования 2022 г. выделены шесть сейсмолещ (ССТ).

ССТ Б-А – широко распространена, внутренняя акустическая структура, как правило хаотична. Верхняя граница сейсмолещи представляет собой расчлененную поверхность несогласия с высокой амплитудой отражения, что соответствует латерально устойчивому региональному сейсмогоризонту А (кровля ледниковых образований). Для акустического импульса 10-12 кГц сейсмолещи Б1-А непроницаема.

ССТ А-А1 – распространена повсеместно, характеризуется конформным облеканием рельефа кровли подстилающей ССТ. Внутренняя инфраструктура записи представляет собой серию выдержанных параллельных осей синфазности с относительно высокой интенсивностью отражений. Верхняя сейсмометрическая согласная граница прослежена по изменению амплитуды отражений внутренних слоев толщи. Выдержанная по латерали мощность ССТ составляет 5-7 м.

ССТ А1-А2 – широко распространена, но может быть эродирована на отдельных поднятиях. Внутренняя инфраструктура записи, как и для толщи А-А1, представляет собой серию выдержанных параллельных осей синфазности с более высокой интенсивностью отражений, чем нижележащая толща. Внутренние слои залегают субпараллельно кровли подстилающей ССТ. Верхний сейсмический горизонт (А2), ограничивающий толщу, в пределах Невской губы латерально устойчив, отличается высокой интенсивностью отражения, соответствует границе эрозионного характера. Мощность ССТ составляет 5-8 м, выклиниваясь (срезана) на отдельных возвышенностях в результате размыва.

ССТ А2-А3 – широко распространена, несогласно залегая нижележащих отложениях. На отдельных возвышенностях отсутствует или усечена по мощности в результате эрозии. В пределах Невской губы характеризуется субгоризонтальным (несогласным) залеганием с параллельными внутренними отражателями малой амплитуды. Верхняя граница маркируется

по сильному отраженному сигналу и имеет вероятно регрессивный характер. Мощность ССТ довольно выдержана и составляет 3-4 м.

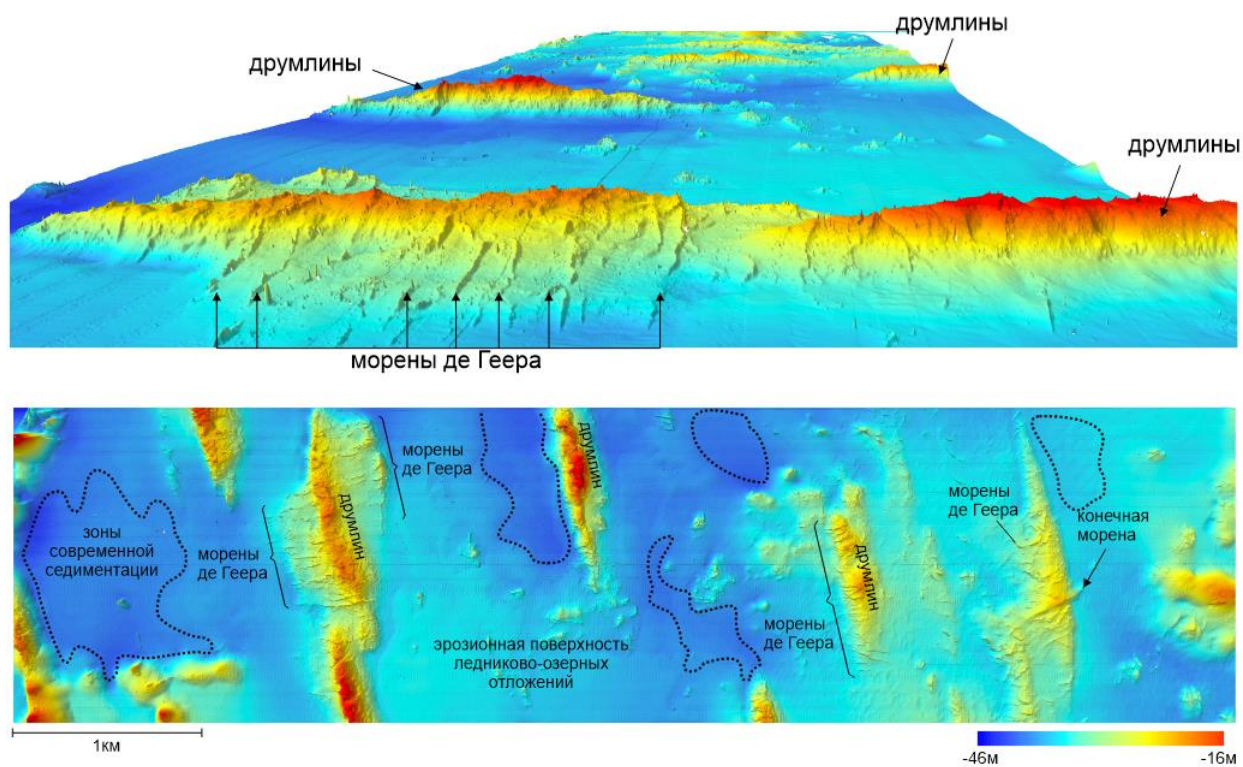
ССТ А3-А4 - светлый интервал, иногда лишен отражателей; ближе к его нижней и верхней частям могут появиться несколько субгоризонтальных параллельных более темных полос. Верхняя граница прослеживается по изменению интенсивности (тона окраски) акустического сигнала. Мощность ССТ на записях НСАП не превышает 3-4 м.

ССТ А4-Д – поверхностная толща, распространена локально, часто темно-серая бесструктурная запись, иногда с субгоризонтальными, близко расположенными параллельными рефлекторами. Мощность на записях НСАП обычно не более 1-2 м.

На некоторых сейсмоакустических профилях две последние сейсмотолщи объединяются в единую ССТ А3-Д.

Участок в Выборгском заливе имеет ледниковый грядовый рельеф, частично погребенный ледниково-озерными и голоценовыми отложениями. В рельефе выделяются гряды СЗ-ЮВ простирания – друмлиноиды, осложненные серией наложенных поперечных мелких гряд, интерпретируемых как морена Де Геера (рис. 1). Станция АБП53056 была выполнена на вершине друмлиноида, сложенного ледниковыми отложениями – галькой и валунами. Поднятый со дна валун представляет собой обломок породы (граниты) размером до 20 см в поперечнике, по контуру контакта обломка с дном наблюдается развитие корки железо-марганцевого состава. Станция АБП53057 приурочена к небольшому поднятию, донные осадки которого представлены сферическими конкрециями размером до 3 см, незначительным содержанием мелкого гравия и грубозернистого песка, подстилающимися глинами предположительно озерно-ледникового генезиса. С точки зрения литофациальных особенностей, данный участок характеризуется интенсивным размывом более древних отложений – неоплейстоценовых глин, на поверхности которых формируются ЖМК. Осадки станции АБП53058 были отобраны в ложбине, выделяющейся как на данных многолучевого эхолотирования, так и на бэкскаattere участком наиболее темного цвета. Данные осадки представлены черными текучими алевропелитами с резким запахом сероводорода, на поверхности которых наблюдается маломощный буро-коричневый текучий наилок. По этим данным можно говорить о стабильном современном осадконакоплении в понижениях рельефа дна и возможном привносе кислорода придонными течениями. Осадки на станции АБП53060 также отражают зону размыва нижележащих отложений, поскольку на поверхности (0-5 см) наблюдается текучий алевропелит с включениями дресвы гранитов и полевых шпатов, грубозернистого песка и ЖМК дисковидной формы в диаметре до 5 см. Ниже данного слоя (5-12 см) отмечается мягко-пластичная песчаная алевроглина.

Участок в районе о. Гогланд представляет собой морскую голоценовую равнину, осложненную локальными изолированными линейными впадинами и поднятиями частично экзарированных дочетвертичных кристаллических пород (рис. 2). Возвышенные участки дна перекрывают моренные образования, образующие локальные скопления друмлинов. Выровненные субгоризонтальные участки дна выполняют голоценовые алевропелитовые газонасыщенные осадки. За счет действия придонных течений формируются эрозионные ложбины, оконтуривающие подводные возвышенности. Для проб поверхностных отложений был выполнен гранулометрический анализ, отобранных в пределах изучаемого полигона. Полученные данные показали преобладание содержания частиц алевритовой размерности от 54 % до 77% в донных осадках, содержание частиц песчаной размерности составляет от 5 % до 38 %, пелитовой – от 7 % до 18 %.



АБП53056



АБП53058



АБП53057



АБП53060

Рис. 1. Результаты МЛЭЛ и донного пробоотбора в районе Выборгского залива.

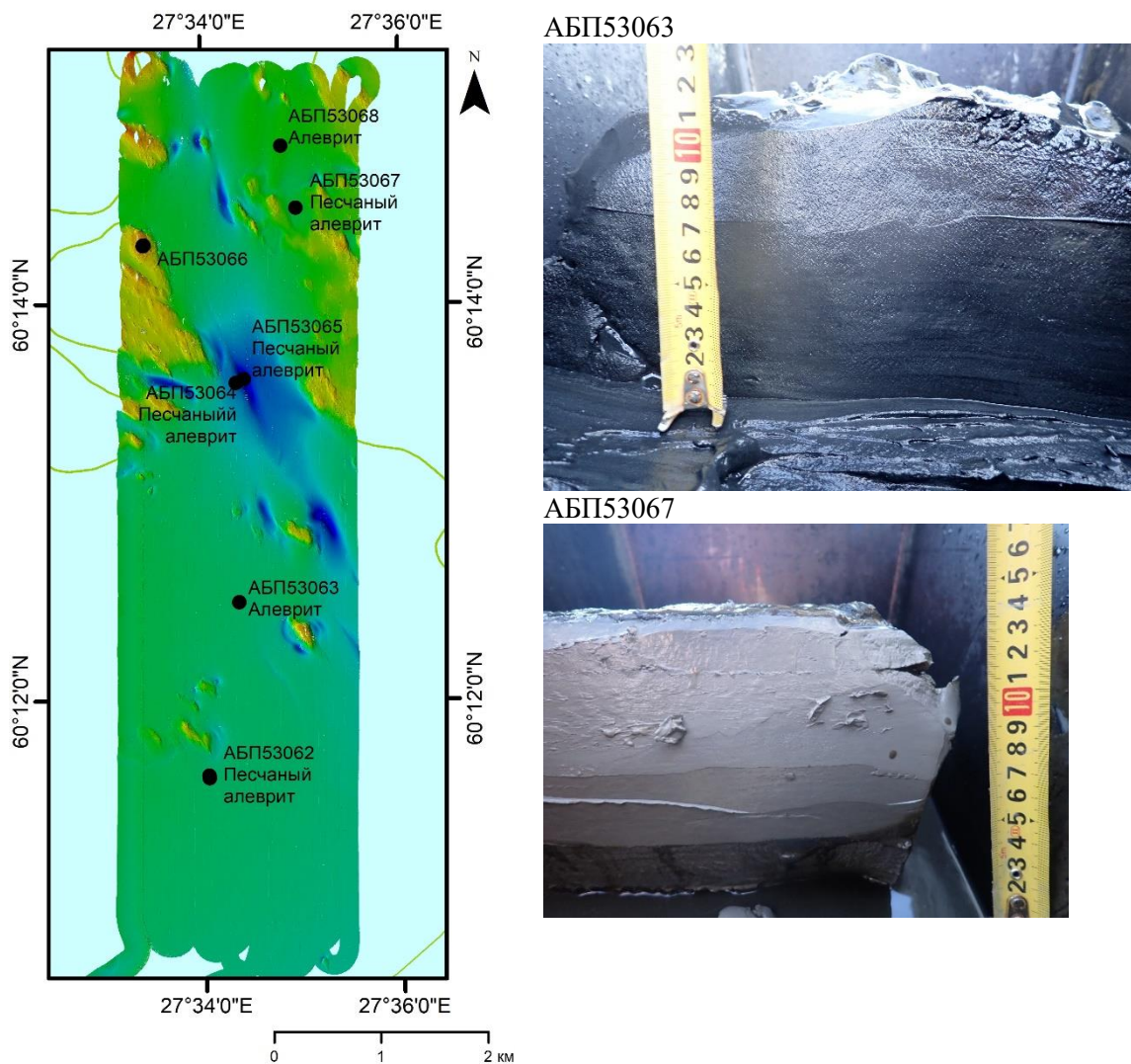


Рис. 2. Расположение станций опробования дночерпателем в районе о. Гогланд и фотографии разрезов донных отложений на станциях АБП53063 и АБП53067.

Участок в Копорской Губе имеет пологоволнистый преимущественно ледниково-озерный рельеф дна. Волны образует регулярные линейные формы СЗ-ЮВ направления. Полученные данные НСАП показывают, что волны рельефа образованы эродированными ледниково-озерными отложениями, наследующими подстилающий моренный рельеф. Современное осадконакопление развито крайне локально в наиболее углубленных впадинах. Участок характеризуется наличием динамически развивающихся покмарков, выявленных ранее (в 2012-2022 гг.). На площади выполнено 6 станций комплексного отбора грунтов для проведения литологического, газового, химического и гидрохимического анализа. Предполагается выявление геохимических и гидрохимических аномалий, обусловленных проявлениями газо-флюидной разгрузки.

Заключение

В ходе экспедиционных работ 2023 г. ВСЕГЕИ совместно и АО ИО РНА получены новые данные многолучевого эхолотирования и высокоразрешающего непрерывного сейсмоакустического профилирования на трех участках в районе о. Гогланд, в районе Выборгского залива и в районе Копорской Губы.

Установлено, что особенности рельефа дна восточной части Финского залива во многом обусловлены наследованием ледниковых форм рельефа типа гряд, друмлиноидов и др. СЗ-ЮВ

простираются. Понижения рельефа морского дна, являющиеся голоценовыми седиментационными бассейнами, локализуют современное осадкообразование. В ходе работ был выявлен широкий спектр поверхностных отложений, распределение которых контролируется, в первую очередь, рельефом дна и историей развития, а также гидродинамической активностью. По результатам детальных площадных исследований выявлены и закартированы многочисленные затопленные комплексы ледникового и водно-ледникового происхождения (конечная морена, друмлины, озы, морены Де Геера). Построены трехмерные пространственные геологические модели на основе сейсмостратиграфического расчленения толщ. В голоценовых отложениях выявлены эрозионные горизонты, просадки грунта и впадины обусловленные газофлюидной разгрузкой и действием придонных течений. Апробирована методика детального геологического морского картирования четвертичных образований (масштабы 1 : 25 000 – 1 : 10 000).

Финансирование

Экспедиционные исследования в районе Копорской Губы проведены в рамках Госзадания ВСЕГЕИ по объекту «Государственный мониторинг состояния недр по территории Российской Федерации в 2023-2025 годах (прибрежно-шельфовые зоны Белого, Баренцева и Балтийского морей)»

Экспедиционные исследования в открытой части Финского залива проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (целевое финансирование на проведение морских экспедиционных исследований) в рамках государственного задания № FMWE-2021-0012.

Список литературы:

1. Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Носевич Е.С., Прищепенко Д.В., Жамойда В.А., Пискарев-Васильев А.Л., Элькина Д.В., Баширова Л.Д., Пономаренко Е.П., Буданов Л.М., Григорьев А.Г. Эволюция среды седиментации послеледниковых водоемов восточной части Финской залива под воздействием климатических изменений // *Океанология*, 2022, том 62, № 3, с. 466–484
2. Paka, V.T., Zhurbas, V.M., Golenko, M.N., Korzh, A.O., Kondrashov, A.A., Shchuka, S.A., Innovative closely spaced profiling and microstructure measurements in the southern Baltic Sea in Summer/Autumn 2016-2018 with special reference to the bottom layer // *Front. Earth Sci.* 2019. V. 7. A.111
3. Ryabchuk D., Orlova M., Kaskela A., Kotilainen A., Sergeev A., Sukhacheva L., Zhamoida V., Budanov L., Neevin I. The eastern Gulf of Finland – brackish water estuary under natural conditions and anthropogenic stress // *Seafloor geomorphology as benthic habitat. GeoHab Atlas of Seafloor Geomorphologic Features and Benthic Habitats. Second edition. Eds. Peter T.Harris, E.Baker. Elsevier, 2020, pp. 281-301.*
4. Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Prishchепенко D.V. et al. Impact of climate change on sedimentation processes in the eastern Gulf of Finland during the Middle to Late Holocene // *Boreas*. 2021. V. 50 (2). P. 381–403.
5. Virtasalo, J. J.; Ryabchuk, D.; Kotilainen, A. T.; Zhamoida, V.; Grigoriev, A.; Sivkov, V.; Dorokhova, E. Middle Holocene to present sedimentary environment in the easternmost Gulf of Finland (Baltic Sea) and the birth of the Neva River. *Marine Geology* 2014, 350, 84–96, DOI.10.1016/j.margeo.2014.02.003.

УДК 550.8.028

Рубрика 67.21.00

ПРАКТИКА И ТРЕБОВАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ ПРИ
ИЗЫСКАНИЯХ НА ШЕЛЬФЕ

PRACTICE AND REQUIREMENTS OF GEOHAZARDS INVESTIGATION AT OFFSHORE
SURVEY

Локтев Андрей Станиславович¹, Рыбалко Александр Евменьевич²

¹ ЦМИ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

² ВНИИОкеангеология, С. Петербург

Loktev Andrey Stanislavovich¹, Rybalko Alexander Evmenievich²

¹ CMI MSU M. V. Lomonosov, Moscow

² VNIIOkeangeologia, St. Petersburg

Введение

Изучение различных природных опасностей является составной частью инженерных изысканий, являющейся прикладной наукой, и посвященной взаимосвязи и взаимовлиянию природных факторов и объектов строительства. К гидротехническим сооружениям на шельфе относятся преимущественно объекты нефтегазовой инфраструктуры (платформы, терминалы, трубопроводы, скважины, места стоянок, заводы СПГ и пр.). При проектировании, строительстве, эксплуатации и ликвидации таких объектов необходимо изучать и прогнозировать изменчивость природной среды и условий, так как последние относятся к технически сложным и особо опасным, а воздействие на окружающую среду и человека могут оказаться катастрофическими.

В области строительства и изысканий применяются нормативные и законодательные акты, регламентирующие порядок проведения и требования к различным видам работ. Система технического регулирования включает как федеральные законы, обязательные к всеобщему применению (№190ФЗ-Градостроительный кодекс, №384ФЗ Технический регламент о безопасности зданий и сооружений и др.), так и собственно технические регламенты (своды правил, государственные и ведомственные стандарты и нормативы).

Нормативная база

Российская нормативная база подразумевает четкую иерархию регламентирующих документов, начиная СП 47.13330.2016 и далее по видам изысканий, в том числе СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ и СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования [2, 4, 5]. Указанные базовые документы содержат лишь самые общие требования о необходимости изучения опасных природных (включая геологические) процессов, которые могут оказывать влияние на морские сооружения, без определения видов, объемов, методики или периодичности их выполнения.

Кроме этого действует ряд специальных сводов правил, регламентирующих ранжирование и изучение природных опасностей: СП 115.13330.2016 Геофизика опасных природных воздействий [3], СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов, СП 58.13330.2012 Гидротехнические сооружения. Основные положения, ГОСТ 22.0.03-97, ГОСТ 57123-2016, ГОСТ 57148-2016, ГОСТ Р 22.1.06-99, СП 14.13330.2011 СП 11-105-97 и др.

В добыче углеводородов на шельфе принимают участие различные международные компании и корпорации, поэтому при инженерных изысканиях широко применяются и зарубежные и международные стандарты (ISO, EN, ASTM, API, BS, ISSMGE и др.). В частности, ISO 19901-8 Marine Soil Investigation, ISO 19901-10 Marine geophysical investigation, OGP 373-18-1. Guidelines for the conduct of offshore drilling hazard site surveys. 2013; OSIG 372-18-2. Conduct of offshore drilling hazard Site Surveys. 2015 [7-9]. Настоящие нормативы возможны к применению и в отечественной практике, однако набор опасностей ими рассматриваемый, узкий и специфичный, а сами стандарты затрагивают только методику исследований.

Терминология

Термин «геологическая опасность» не имеет четкого определения в нормативной литературе, как отечественной, так и зарубежной. Это усложняет порядок и может нарушать единообразие понимания базового смысла самой задачи их исследований. В российских нормативах используются термины, схожие по смыслу: *опасные геологические процессы* (и явления), *природные процессы*, *техногенные процессы* и воздействия... В частности, в новом СП 47.13330.2016 нет понятия «геологическая опасность», но введен *опасные природные процессы и явления*, подразумевающий все (природные?) процессы и явления, «оказывающие негативные или разрушительные воздействия на здания и сооружения». Здесь же содержится понятие *инженерно-геологический процесс* – «изменение состояния компонентов геологической среды во времени и в пространстве под воздействием техногенных факторов». СНиП 22-01-95 содержит понятие *опасное природное воздействие* – «проявление природных процессов, оказывающих вредное или разрушительное воздействие на живые организмы, народнохозяйственные объекты и среду обитания».

СП 115.13330.2016 *опасный геологический процесс* определен как «изменение состояния приповерхностной части литосферы (геологической среды), обусловленное естественными или техногенными причинами, которое может привести к негативным последствиям для человека, объектов хозяйства и окружающей среды». Следует также отметить, что СП 115.13330.2016 содержит перечень *опасных процессов и явлений*, среди которых фактически нет тех, что встречаются на шельфе. Имеются также различные определения данного термина в ряде геологических и инженерно-геологических словарей.

В стандарте ИСО 19901-8 приведен короткий перечень опасностей, преимущественно связанных со специфическими грунтами (мерзлыми, вулканогенными, карбонатными, органогенными, просадочными, техногенными и пр.). Здесь также присутствует формулировка термина *geohazard* (геоопасность), как *состояния геологической среды, которое приводит или имеет потенциал в дальнейшем приводить к разрушению или неконтролируемому риску*. OSIG 372-18-2 [9] определяет геоопасность как *геологическое условие, при котором имеется вероятность причинения вреда людям и ущерба имуществу*.

Как следствие неоднозначное толкование понятия «геологическая опасность» может трактоваться как:

- геологический объект, явление и/или процесс, неблагоприятно воздействующий на экосистему,

- обстановка при которой в геологической среде появляется возможность возникновения угрозы ущерба инженерным сооружениям, хозяйственным объектам, окружающей среде, людям, животным, условиям их обитания и жизнедеятельности,
- угроза образования нового или активизации существующего геологического или инженерно-геологического процесса, способного поражать людей, наносить материальный ущерб, разрушительно действовать на окружающую среду.

Учитывая такое многообразие подходов предлагается понимать под *геологической опасностью совокупность геологических процессов и явлений, которые могут неблагоприятно воздействовать на человека, инженерные сооружения, окружающую среду* [6].

Практика изучения геологических опасностей

В таблице 1 даны основные методы и их применимость для изучения различных геологических опасностей и факторов, которые распространены на шельфе с учетом практики инженерных изысканий и требований нормативных документов. В соответствии с существующей практикой методы подразделяются на геофизические (косвенные, не инвазивные) и геотехнические (прямые, инвазивные)

Таблица 1. Методы и средства для изучения основных геологических опасностей на шельфе

Геологический фактор/опасность	Метод изучения	Примечания
Сейсмическая активность	Сейсмические исследования донными станциями (СДМС), береговые сейсмостанции	Зона распространения – Дальневосточные моря
Тектонические движения	Сейсмика высокого и сверхвысокого разрешения (СВР, ССВР)	Изучение геологического разреза на глубину до 1км (и более)
Геокриологические процессы и явления	Сейсмоакустические низкочастотные методы, ВСП, электроразведка (НАЗ, ВЭЗ, ВП и др.), эхолотирование, СДМС. мониторинг Бурение, статическое зондирование (ТСРТ), скважинный каротаж	Сейсмоакустические и сейсмические методы обычно малоэффективны, более применима электроразведка. Физическое вскрытие необходимо для идентификации СММП (ГОСТ 25100). Кратные наблюдения могут характеризовать интенсивность процессов [10, 11]
Газовыделения	Сейсмоакустика (НЧ и ВЧ), ГЛБО, многолучевое эхолотирование, скважинный каротаж, отбор проб (бурение, ЛТС) с и их	Поверхностные методы для идентификации следов на дне. При бурении обязательно применение

Геологический фактор/опасность	Метод изучения	Примечания
	газогеохимический анализ. Мониторинг	пилотных скважин. Кратные наблюдения могут характеризовать интенсивность процессов
Склоновые и придонные перемещения и процессы	ГЛБО, многолучевое эхолотирование, донное опробование (ЛТС), кратные промеры и донное опробование?	Генезис процессов может быть не только геологическим
Неоднородность состава и сложения геологической толщи	Сейсмические (СВР, ССВР, СУВР) и сейсмоакустические методы (НСП НЧ и ВЧ; Бумер, Спаркер, Чирп) Бурение, пробоотбор ЛТС, статическое зондирование	Сейсмические методы высокоэффективны. Следует заверять результаты инвазивными методами
Специфические отложения (грунты) в разрезе	Сейсмоакустика (НСП ВЧ, НЧ), СУВР, ССВР, ВСП, ВЭЗ Бурение, пробоотбор ЛТС, статическое зондирование, скважинные испытания (крыльчатка, прессиометр)	Сейсмоакустика, сейсмика, электроразведка позволяют выделять границы, зоны, распространение, для идентификации грунтов необходимо использование инвазивных методов

Заключение

Изучение опасных геологических опасностей является составной и обязательной частью инженерно-геологических изысканий для строительства. Рядом нормативных документов такие работы определены как обязательные и подразумевают качественную или количественную характеристику воздействий и прогноз соответствующего изменения инженерно-геологических условий (влияющих на условия строительства или эксплуатации объекта). СП 446.1325800.2019, СП 504.1325800.2021, OSIG №373-18-2 описывают способы, применимые для исследования различных опасностей. Вместе с тем ни отечественные, ни зарубежные нормативно-методические документы не дают детального описания методики, видов и объемов работ, а также частоты и периодичности их проведения для получения надежных данных для проектирования морских объектов. Очевидно, требуется разработка дополнительных нормативно-методических нормативов для изучения отдельных видов геологических опасностей на шельфе или региональных и ведомственных документов для восполнения такого пробела.

Список литературы

1. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация. М. 2020
2. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Общие положения (актуализированная редакция СНиП 11-02-96). М. 2016.
3. СП 115.13330.2015 Геофизика опасных природных воздействий. М. 2015.

4. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М. 2019
5. СП 504. 1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования. М. 2021.
6. Локтев А.С., Миронюк С.Г., Рыбалко А.Е. Материалы XII научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в РФ». Нормативная база проведения морских изысканий по изучению опасных геологических процессов. С. Петербург. 2016
7. ISO 19901-8 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: “Marine Soil Investigation”. 2014
8. ISO 19901-10. Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8. Marine Geophysical site investigations. 2019.
9. Conduct of offshore drilling hazard Site Surveys – Technical Notes. OGIP report No. 373-18-2. 2015
10. Loktev A. et all. Russian arctic offshore permafrost. Proceedings of the 7th international conference on offshore site investigation and geotechnics. London. 2012.
11. Paull Charles K. et all. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates. Geophysical research letters, Vol. 34, 2007

УДК 550.793.9 +551.432

Рубрика 38.43.21

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА

NEW DATA ABOUT THE STRUCTURE OF QUATERNARY SEDIMENTS OF
KANDALAKSHA BAY

**Рыбалко Александр Евменьевич^{1,2,3}, Токарев Михаил Юрьевич⁴, Кудинов Артем
Анатольевич¹, Бирюк Мария Александровна², Корост Светлана Радиковна³,
Репкина Татьяна Юрьевна⁷, Терехина Яна Евгеньевна⁴, Беляев Павел Юрьевич¹,
Потемка Андрей Константинович⁵, Алешин Михаил Игоревич⁴, Дронь Олег
Владимирович⁶**

¹ФГБУ «ВНИИОкеанология, Санкт-Петербург,

² Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург

³ЦМИ МГУ им М.В. Ломоносова, Москва

⁴МГУ им. М.В. Ломоносова,

⁵ООО «Сплит»

⁶ФГБУ ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург

⁷Институт Географии РАН РФ, Москва

**Rybalko Alexander Evmenievich^{1,2,3}, Tokarev Mikhail Yurievich⁴, Kudinov Artem
Anatolyevich¹, Biryuk Maria Aleksandrovna², Korost Svetlana Radikovna³, Terekhina
Yana.Evgenievna⁴, Belyaev Pavel Yurievich¹, Potemka Andrey Konstantinovich⁵, Aleshin
Mikhail Igorevich⁴, Dron Oleg Vladimirovich⁶**

¹FSBI "VNIIOkeanologiya", St. Petersburg,

² Institute of Geosciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg

³CMI MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow

⁴MSU named after. M.V. Lomonosov,

⁵LLC "Split"

⁶FSBI VSEGEI, St. Petersburg

Введение

Кандалакшский залив является одним из наиболее изученных районов в Белом море. Пролив Великая Салма – природная база для практики Московского государственного университета наглядно иллюстрирует это высказывание карта сейсмопрофилей, выполненных на ограниченной площади. Тем не менее, в открытой части Кандалакшского залива последние сейсмоакустические профили были пройдены в 80-е годы прошлого века. За прошедшее время накопились новые данные о строении четвертичного покрова Белого моря. Это касается и новых сейсмостратиграфических схем, полученных принципиально обновленной

сейсмической аппаратурой, и сведений о влиянии сеймотектонических и гравитационных процессов на формирование как

морфоструктуры Кандалакшского залива, так и строения четвертичного покрова, покрывающего его дно. Проведенные в 2022-2023 году геолого-геофизические исследования (многоканальное высокоразрешающее сейсмоакустическое профилирование и геологический пробоотбор) позволили получить новые данные о строении четвертичных отложений в зоне перехода от глубоководной к мелководной части Кандалакшского залива и в мелководной Нильма губе, являющейся частью пролива Великая Салма. В открытой части Кандалакшского залива была существенно уточнена существовавшая с конца прошлого века сейсмостратиграфическая схема верхнечетвертичных отложений. Прежде всего, было проведено более детальное расчленение самой толщи рыхлых осадков и выделение сеймопачек, отражающих различные по генезису процессы седиментации.

Получены новые сведения о палеогеографическом развитии верхней части Кандалакшского залива, в частности, изменения палеогидрологического режима в раннем голоцене. Целью нашего доклада является привлечь внимание слушателей не только к возможностям геофизических, прежде всего сейсмических методов, для изучения вопросов палеогеографии и современной геодинамики, но и показать первые результаты проведенных исследований в рамках гранта РФФ 22-17-00081.

Данные и методы

В работе обсуждаются материалы интерпретации сейсмоакустического профилирования, а также геологического пробоотбора, выполненного в 2021-2023г.г. Работы проводились с НИС «Профессор Зенкевич», специально оборудованного для проведения геофизических работ. Сейсмоакустическое профилирование проводилось с использованием электроискрового источника SplitMultiSeisSparker (ООО «Сплит») и накопителя энергии MultiJack 5000HP6.0 (ООО «Геодевайс»). Центральная частота излучаемого сигнала составляла порядка 300 Гц. В качестве приемного оборудования использовалась 16-канальная сейсмическая коса SplitMultiSeisStreamer 16ch(ООО «Сплит») с шагом 2 м между гидрофонами и сеймостанция SplitMultiSeisStation(ООО «Сплит»). В ходе работ источник буксировался за судном на расстоянии 61,5 м, а сейсмическая коса на расстоянии 10 м от источника.

Геологический пробоотбор проводился также с НИС «Профессор Зенкевич» Использовалась грунтовая трубка длиной 3м и весом до 300 кг. Отбор кернов проводился в пластиковые трубы, которые впоследствии были доставлены в Москву для проведения томографических исследований, а далее в Санкт-Петербург, где керны разрезались и из них отбирались пробы на биостратиграфические и литологические исследования.

Полученные результаты

Сейсмоакустические работы в высокоразрешающей методике позволили получить новые данные как о глубоководной части Кандалакшского залива, так и о подводной гряде в районе островов Средние Луды, которая сложена кристаллическими породами архей-протерозойского возраста. Эта гряда, расположенная между островом Великий и Порьей губой, разделяет две части Кандалакшского залива. Глубоководная часть наследует рифейский рифт, во многом определяющий современный облик Белого моря, а верхняя, более узкая и мелководная часть залива, по мнению А.С. Балужева, представляет новообразованный в неоплейстоцене (по крайней мере, до наступления валдайского ледника) неотектонический рифт, получивший название «Колвицкий», который переживает

период активного развития, о чем свидетельствуют и зафиксированные в голоцене сеймотектонические события, а также многочисленные сейсмодислокации, зафиксированные как в Карелии, так и в южной части Кольского полуострова [Шварев и др., 2022]. Именно в этой части Кандалакшского залива происходит перенос напряжений растяжения с юго-западного борта в южной части рифтовой зоны на северо-восточный [Балуев и др., 2013].

Глубоководный сейсмоакустический профиль, проходящий от траверза восточного окончания острова Великий на юге до Кандалакшского берега Кольского полуострова к западу от пос. Умба показывает принципиальную разницу строения четвертичных отложений и рельефа у южного и северного берегов (рис.1). Южный борт имеет ступенчатый характер, во многом обусловленный кулисообразным погружением морского дна по серии вытянутых вдоль берега разломам. Вторым важным элементом донного рельефа являются сложно построенные моренные гряды (1). Межгрядовые пространства заполнены мощными толщами ледниково-морских осадков (2), которые, в свою очередь, перекрыты относительно маломощным чехлом морских нефелоидных осадков (3).

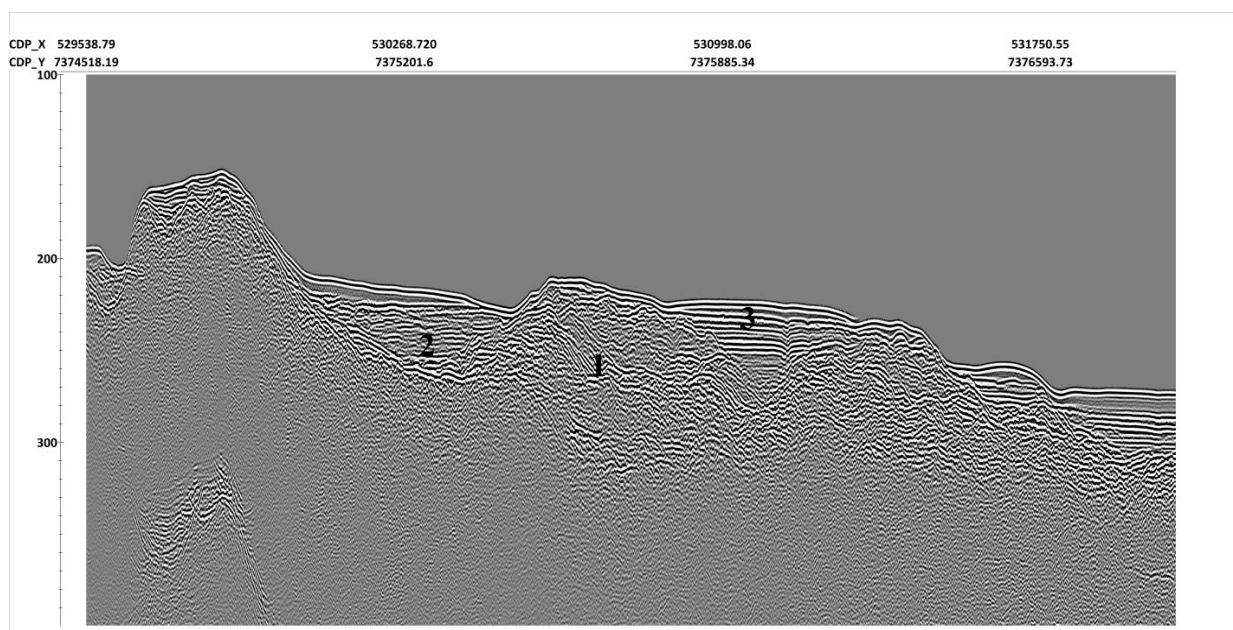


Рисунок 1 сеймопрофиль. Южная часть сеймопрофиля через глубоководную впадину. Значения цифр в тексте.

В центральной части профиля, на глубинах более 200м моренные отложения характеризуются очень неравномерным распространением. Они перекрыты мощным чехлом ледниково-морских осадков, в которых можно уверенно проследить несколько циклов осадконакопления. Голоценовые морские нефелоиды формируют относительно ровный горизонт мощностью до 10м. Но настоящим сюрпризом является выявление в глубоководной части залива дайкообразных магматических образований (4), формирующих гряды высотой до 30м (рис.2).

Северный склон имеет совершенно другое строение. До глубин 100м идет расчлененная, покрытая мореной поверхность с небольшими впадинами выполненными ледниково-морскими осадками. Относительно мощные нефелоидные осадки начинаются с глубин порядка 170м. Однако, и на севере и на юге четко выраженные ледниковые гряды не выделяются, что указывает на движение ледника только по ложу залива и отсутствие боковых притоков (за исключением Порьей губы).

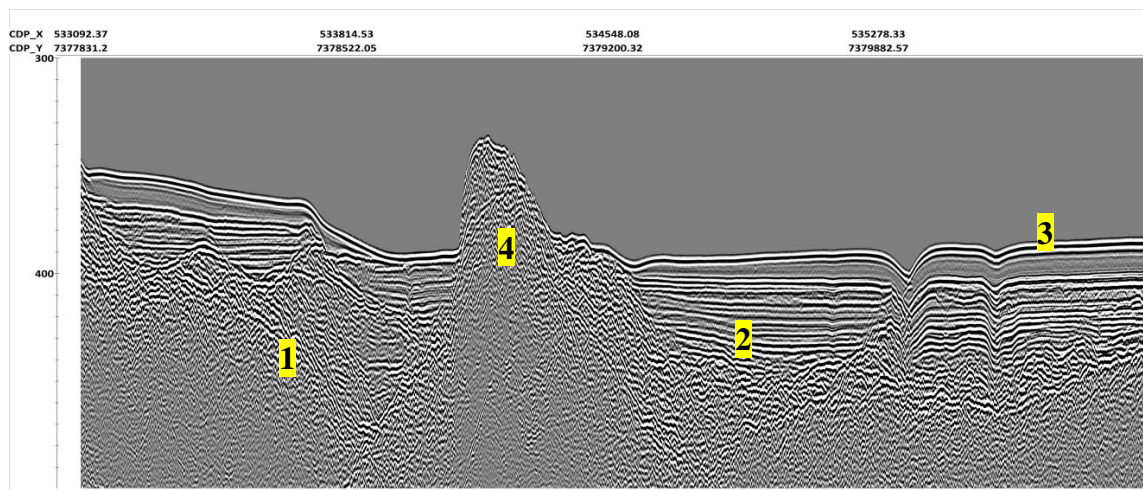


Рисунок 2 Фрагмент сейсмопрофиля через центр. глубоководной впадины Кандалакшского залива. Значения цифр см. выше в тексте.

Зато гряда Средних луд является основой для формирования осциляторного комплекса ледниковых отложений. Продольные сейсмопрофили, протягивающиеся с юго-востока на северо-запад (рис.3), показывают сложно построенный юго-восточный склон этой гряды. Он имеет ступенчатый характер. Ступенчатость обусловлена серией разломов северо-восточного простирания, сохраняющих активность в голоцене. На ступенях отмечаются мелкие моренные гряды, сформированные ледниковыми осцилляциями, между которыми располагаются локальные зоны накопления ледниково-морских и нефелоидных осадков. Наличие этих зон подтверждается данными геологического пробоотбора. Уникальным результатом можно считать выявление гляциоотторженца рифейских пород в привершинной части гряды (рис.3). Обязательным элементом геологического строения таких структурно-денудационных склонов являются вызванные современными геодинамическими движениями гравитационные формы рельефа, такие как оползни и связанные с ними локальные зоны накопления голоценовых нефелоидных илов.

В 2024 году были выполнены локальные сейсмоакустические исследования в средней части губы Кандалуха. Эти материалы в настоящее время еще обрабатываются, но уже сейчас мы можем констатировать, что вдоль южного побережья Кольского полуострова постепенно к вершине залива уменьшается мощность надморенных отложений (при том, что сама морена имеет мощность более 10м). При этом практически из сейсморазреза выпадают слоистые отложения, которые ассоциируются с ледниково-морскими образованиями. Следовательно, напрашивается вывод, что, скорее всего, в раннем голоцене здесь существовали условия размыва, которые и уничтожили эти образования, а дно залива занимало гораздо более высокий батиметрический уровень, вплоть до полного исчезновения или сильной редукции границ водного бассейна.

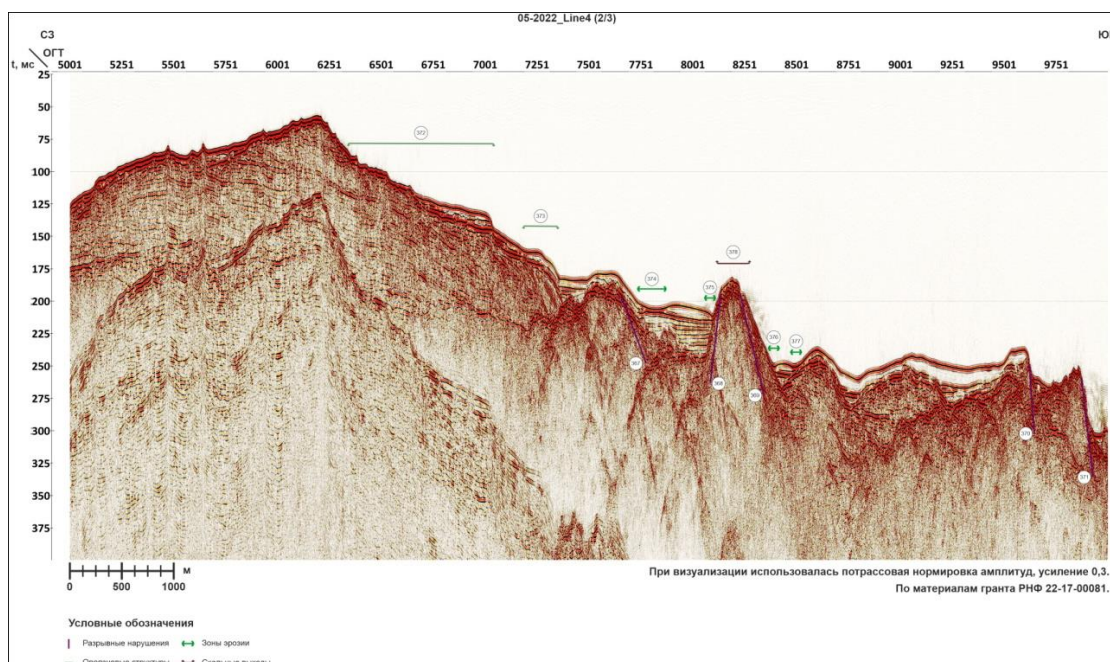


Рисунок 3 Сложнопостроенный структурно-денудационный рельеф юго-восточного склона гряды Средних Луд. Сейсмограмма.

Существенная смена палеогидрологического режима происходила, как указано было во введении и в Нильма губе, т.е. в проливе Великая Салма. Полученные колонки убедительно показывают, что в вертикальном разрезе мы видим последовательную смену фациальных условий приледниковых бассейнов морским, достаточно глубоководными с преобладанием нефелоидной седиментации, которые примерно в суббореальное время сменились накоплением течениевых осадков, т.е. произошло существенное обмеление части современного залива. При этом, в береговой зоне продолжался подъем суши, одним из свидетельств которого является формирование вдольбереговых озер, проходящих через стадию миромиктических озер.

Таким образом, полученные новые сейсмоакустические данные указывают на определяющее влияние новейших тектонических (геодинамических) движений на формирование морфоструктуры Кандалакшского грабена в зоне перехода его от унаследованной от рифейского периода котловины к активно развивающейся в настоящее время структуре (Колвицкого грабена, в понимании А.С. Балуева), сложный, блоковый характер реакции кристаллического фундамента на продолжающееся растяжение и формирование новой рифтогенной структуры в верхней части Кандалакшского залива.

Авторы выражают свою благодарность администрации и коллективу ББС МГУ им. М.В. Ломоносова, без поддержки которой эти исследования были бы невозможны. Доклад подготовлен при финансовой поддержке гранта РФФ №22-17-00081.

Список литературы:

1. Балуев А.С., Журавлев В.А., Терехов Е.Н. Тектоника Белого моря и прилегающих территорий: Объяснит. записка к «Тектонической карте Белого моря и прилегающих территорий». 1 : 1 500 000 // Тр. ГИН РАН. 2012. №597. С. 1-104.
2. Шварев С.В., Бондарь И.В., Романенко Ф.А., Луговой Н.Н. Голоценовые палеосейсмодеформации на островах Кузокоцкого архипелага (Кандалакшский залив

Белого моря, восточная Фенноскандия) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т.2. №21. С. 9-43.

УДК 551.89

Рубрика 39.19.29

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ПЕРЕХОДЕ ОТ ПОЗДНЕГО НЕОПЛЕЙСТОЦЕНА К ГОЛОЦЕНУ
НА КАНДАЛАКШСКОМ И ТЕРСКОМ БЕРЕГАХ БЕЛОГО МОРЯ

THE LATE PLEISTOCENE - HOLOCENE TRANSITION ON THE KANDALAKSHA AND
TERSKIY COASTS OF THE WHITE SEA: NEW DATA

**Зарецкая Наталия Евгеньевна^{1,2,3}, Баранов Дмитрий Валерьевич¹, Писцова Мария
Андреевна^{1,4}, Хайтов Вадим Михайлович⁵, Рыбалко Александр Евменьевич^{3,6}**

¹*ИГ РАН, Москва*

²*ГИН РАН, Москва*

³*ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург*

⁴*МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

⁵*СПбГУ, Санкт-Петербург*

⁶*ЦАСДМГУ, Москва*

**Nataliya Zaretskaya^{1,2,3}, Dmitrii Baranov¹, Maria Pistsova^{1,4}, Vadim Khaitov⁵, Aleksandr
Rybalko^{3,6}**

¹*IG RAS, Moscow*

²*GIN RAS, Moscow*

³*VNIIOkeangeologia, St-Petersburg*

⁴*MSU M.V. Lomonosov, Moscow*

⁵*St-Petersburg University, St-Petersburg*

⁶*SC-LMSU, Moscow*

Введение

Переход от позднего неоплейстоцена к голоцену на севере Европы ознаменовался быстрой деградацией оледенения, резкими климатическими колебаниями и глобальными перестройками природной среды. Территория Кольского полуострова, омываемая с севера Баренцевым, а с юга – Белым морями, являлась практически центром последнего оледенения (Demidov et al., 2006), поэтому переход от ледниковой эпохи к межледниковой проявился на ней особенно ярко. Южное побережье полуострова – Кандалакшский и Терский берега Белого моря – являлось в тот период ареной взаимодействия ледниковых и морских природных процессов (Рыбалко и др., 2017). Целью нашего исследования была реконструкция позднеледниковой истории этого района (как фрагмента истории последнего гляциоседиментационного цикла Белого моря), запечатлённой в рельефе и седиментационных палеоархивах побережья.

Материалы и методы

Полевые работы проводились на Кандалакшском и Терском берегах Белого моря, на участке от г. Кандалакши до устья р. Варзуги, и включали литостратиграфическое изучение разрезов и кернов скважин и отбор образцов на аналитические (спорово-пыльцевой, диатомовый, фораминиферовый, гранулометрический анализы) и геохронометрические (ОСЛ и радиоуглеродное датирование) исследования, а также DGPS съёмку.

Результаты

Во время работ было выявлено три типа объектов, в которых переход от позднего неоплейстоцена к голоцену выражен особенно отчётливо.

Первый тип – водноледниковые геологические тела, перекрытые морскими отложениями. Мы изучили два таких объекта – к северу от Кандалакши (карьер Лупче-Савино) и к востоку от с. Колвица (карьер на склоне Колвицкой ложбины). В первом случае разрез имеет следующее строение: нижняя часть сложена разнородным песком со слабоокатанным обломочным материалом, размерностью до крупной гальки. Песок перекрыт серой глиной, в кровле которой обильно встречается битая ракушка, по-видимому, *Mytilus edulis*. На глине с размывом залегает светло-серый хорошо отмытый песок с гравием и галькой, и галечно-валунной отмосткой в кровле, которая располагается на высоте 54 м н.у.м.

Во втором случае снизу вверх вскрывается пачка ритмичнослоистых отложений, представляющих собой переслаивание светло-серого тонко-мелкозернистого песка и серого алеврита. В верхней части этой пачки залегают зеленовато-серые горизонтально слоистые алевриты с линзами тонкозернистого песка, периостракумами раковин *Portlandia* и трубками полихет, а в кровле слоя - зеленовато-серая глина, насыщенная обломками раковин *Mytilus edulis*. Абсолютная высота кровли глины – 41 м н.у.м. Осадки этой пачки прислонены к типичной озовой гряде, вытянутой субширотно, и состоящей из окатанного валунно-галечного материала с неявной горизонтальной слоистостью.

Для прослая с раковинами *Mytilus edulis* был выполнен диатомовый анализ. Всего обнаружено 46 видов и разновидностей диатомовых водорослей. Экологические характеристики определены по таблицам (Баринова и др., 2006; Шилова, 2011) и базе Diatoms of North America (<https://diatoms.org/>). Доминируют бореальные виды и космополиты, доля арктических видов невелика. Диатомовая ассоциация слоя в основном состоит из бентосных организмов (около 80% в каждом образце), что свидетельствует о возможности солнечных лучей проникать через водную толщу до дна. В свою очередь, это может говорить о малой глубине и/или невысокой мутности воды. В комплексе с представлениями об экологических предпочтениях моллюсков, раковины которых обнаружены в разрезе, можно установить, что участок характеризовался условиями литорали. Кроме того, во всех препаратах преобладают полигалобы и мезогалобы. Проба у подошвы слоя характеризуется высокой долей индифферентов, а также большей долей планктонных организмов, что, вероятно, маркирует принципиальную смену условий осадконакопления.

Разрезы такого типа можно интерпретировать следующим образом: в первом случае флювиогляциальные отложения были перекрыты морскими с перерывом во времени; здесь, по-видимому, мы наблюдаем литораль с мидиевой банкой, которая впоследствии была переработана волновыми процессами при переходе через береговую линию, и затем перекрыта пляжевым песком. Во втором случае осадки приледникового озера (или залива приледникового водоёма) были перекрыты морскими практически без перерыва. По-видимому, здесь мы наблюдаем постепенный переход от обстановки озерно-ледникового осадконакопления к морской более глубоководной (морское дно с полихетами и портуландиями) и затем мелководной (литораль с мидиевой банкой). Возраст раковин мидий,

определённый радиоуглеродным методом в 9.4–9.3 тыс. лет назад, говорит о мелководной обстановке в раннем голоцене.

Второй тип объектов был изучен нами в борту долины реки Оленица. Здесь в нижней части разреза вскрываются ледниковые осадки последнего оледенения (морена), перекрытые глинами с ленточноподобной слоистостью, характерной для осадков приледниковых водоёмов. Глины перекрываются тонкозернистым песком с тонкими прослоями алевролита, который выше по разрезу переходит в тонкозернистый песок розово-серого цвета. Верхняя часть разреза представлена песчаной толщей, представляющей собой переслаивание мелко-, средне- и крупнозернистого песка с прослоями гравия, галечно-валунными отмостками и разнообразной слоистостью, в том числе – знаков ряби. Здесь мы видим обстановки ледникового осадконакопления (морена), которые в процессе деградации и отступления ледника сменились озёрно-ледниковыми (глина с ленточноподобной слоистостью). Далее последовала переходная фаза (осолонение водоёма), которая затем сменилась морскими более глубоководными (тонкозернистый песок) и пляжевыми (разнозернистый песок с отмостками) обстановками.

Третий тип объектов – приустьевая часть р. Варзуги, которая была изучена нами методом механического бурения шнековым способом. Буровой профиль был заложен по правому берегу реки, от Усть-Варзуги на запад-северо-запад, длиной 15 км. Всего было пробурено 11 скважин, максимальной глубиной 30 м.

В подошве разреза вскрываются коренные породы (терские песчаники), и в районе современного устья Варзуги на глубине 13 м ниже уровня моря сохранилось моренное «ядро». В самом глубоком месте вреза Варзуги (-20 м) непосредственно на коренных породах залегают ленточные глины серого, красноватого или бурого оттенка, и эта толща прослеживается по всему профилю до 45 м н.у.м., с вариациями мощности от 10 (в самом глубоком месте) до 2.5 м. Выше по разрезу (но не во всех скважинах) глины переходят в переслаивание тонкозернистого песка и алевролита. Эта толща, в свою очередь, перекрывается тёмно-серым тонкозернистым песком с прослоями ракуши и рассеянным ракушечным детритом, на высотах от -10 до 10 м н.у.м. На тонком песке залегают разнозернистые пески с горизонтальной и косой слоистостью, местами – с галечными отмостками. В кровле разреза – монотонный мелкозернистый бежевый песок, мощностью от 0.5 до 3 м. Тёмно-серый тонкозернистый песок также встречается в скважинах, пробуренных на поднятых морских террасах по всему профилю, до высоты 33 м н.у.м.

В разрезе устьевой части р. Варзуги мы наблюдаем «классический» последовательный переход от ледниковых отложений (морены) к отложениям пресноводного приледникового водоёма (ленточным глинам), который постепенно осолонялся, и затем к отложениям морского бассейна. Лестница 4-х террасовых уровней сформировалась, по-видимому, в период от позднеледникового до среднего голоцена. Монотонный мелкозернистый песок слагает разнообразные эоловые формы рельефа, широко здесь распространённые.

Выводы

По литературным данным (Невесский и др., 1977; Астафьев и др., 2012; Рыбалко и др., 2017), Белое море при переходе от позднего неоплейстоцена к голоцену проходило следующие этапы развития: ледниковый, ледниково-озёрный, ледниково-морской, переходный и морской (Рыбалко и др., 2022). Однако результаты наших исследований предварительно позволяют «исключить» один из этапов из общей цепочки, а именно – ледниково-морской. По данным, полученным нами для Кандалакшского и Терского берегов, ледниковые отложения (морена) последнего оледенения в Колвицкой ложбине, долине р. Оленицы и в устье Варзуги перекрываются озёрно-ледниковыми осадками (ленточными глинами или песчано-

алевроитовыми ритмитами), или непосредственно морскими (в разрезе Лупче-Савино). В устье Варзуги озёрно-ледниковые осадки перекрываются переходными (то есть, бассейн из пресного постепенно становится солоноватоводным), и затем уже – морскими, с характерной малакофауной и текстурами.

Наши предположения подтверждаются полученными ещё в 70-е годы XX века данными о том, что в ленточных глинах в разрезах Белого моря были обнаружены пресноводные диатомеи (Невесский и др., 1977). Данные по открытой части Белого моря, в том числе и напротив устья р. Варзуги, свидетельствуют, что в ленточнослоистых осадках по данным палинологического анализа были установлены аллерёдские и верхнедриасовые интервалы разреза мощностью 1.5-2.5 м (Джиноридзе и др., 1979); также в отложениях верхнего дриаса был установлен обедненный диатомовый комплекс, состоящий из холодноводных арктобореальных видов, обитающих на незначительных глубинах при пониженной солёности. Характерным видом является *Coscinoscus lacustris var. septentrionalis* Grin. - эвригалинная форма, обитающая на мелководьях вблизи кромки льда (Джиноридзе и др., 1979). Эти данные и привели к выделению ледниково-морского этапа осадконакопления в отложениях позднеледниковья, что, в принципе, не противоречило и взглядам Е.Н. Невесского с соавторами (Невесский и др., 1977). На юге, в Онежском заливе, на ранних этапах развития приледникового бассейна, он был пресноводным. Здесь были выделены спорово-пыльцевые спектры с господством пыльцы берёз (в том числе – кустарничковых) и полыни, что позволило условно датировать их временем 14-13 т.л.н. (Гей и др., 1988), что было подтверждено и данными палеомагнитного анализа (Рыбалко и др., 1987).

Таким образом, существует определенное противоречие в палеогеографической интерпретации ленточнослоистых осадков в литорали и в открытой части Беломорского бассейна.

Благодарность

Авторы благодарят бурового мастера А.Ю. Качалова за самоотверженный труд.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ, № 22-17-00081.

Список литературы:

1. Астафьев Б.Ю., Богданов Ю.Б., Воинова О.А., Воинов А.С., Журавлев В.А., Ногина М.Ю., Парамонова М.С., Пешкова И.Н., Поляков А.А., Рыбалко А.Е., Солонина С.Ф., Семенова Л.Р., Суриков С.Н., Шаров Н.В., Шкарубо С.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Q-37 – Архангельск. Объяснительная записка. СПб.: Карт. ф-ка ВСЕГЕИ, 2012. 302 с.
2. Барина, С.С., Медведева, Л.А., Анисимова, О.В. Биоазнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. PiliesStudio, Тель Авив, 2006, 498 стр.
3. Гей Н.А., Джиноридзе Р.Н., Рыбалко А.Е. и др. Стратиграфия позднеплейстоценовых и голоценовых отложений Онежского залива - Вест. ЛГУ, 1988, сер. 7. вып. 4, с. 65-72.

4. Джиноридзе Р.Н., Калугина Л.В., Рыбалко А.Е. и др. Стратиграфия верхнечетвертичных отложений северной части Белого моря. В кн.: Позднечетвертичная история и седиментогенез окраинных и внутренних морей. М.: Наука, 1979, с.34-39.
5. Невеский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 240с.
6. Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р., Токарев М.Ю. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного Беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене-голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. С 16–84.
7. Рыбалко А.Е., Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Корсакова О.П., Субетто Д.А., Беляев П.Ю., Вашков А.В. Развитие Белого моря в голоцене. // Динамика экосистем в голоцене (сборник статей), 2022, с. 143-148.
8. Рыбалко А.Е., Спиридонов М.А., Спиридонова Е.А. и др. Четвертичные отложения Онежского залива и основные черты его палеогеографии в плейстоцене-голоцене. В кн.: Комплексные морские геолого-геофизические исследования внутренних морей гляциального шельфа. Л.: ВСЕГЕИ, 1987, с. 38-52.
9. Шилова О. С. Голоценовые диатомеи болот Кольского полуострова и Северо-Восточной Карелии //М.: МАКС Пресс. – 2011.
10. Demidov I.N., Houmark-Nielsen M., Kjær K.H., Larsen E. The last Scandinavian Ice Sheet in Northwestern Russia: ice flow patterns and decay dynamics // Boreas. 2006. Vol. 35, Iss. 3, P. 425–433.
11. Diatoms of North America. <https://diatoms.org/> searched on 30 November 2022.

УДК 550.3

Рубрика 38.57.23

**РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРО- И НАЛЕДНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ**

**RESULTS OF MARINE AND OVER-ICE MAGNETIC EXPLORATION IN THE
KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA**

Лыгин Иван Владимирович¹, Ивашкина Ольга Олеговна¹, Кузнецов Кирилл Михайлович¹, Токарев Михаил Юрьевич¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва

**Lygin Ivan Vladimirovich¹, Ivashkina Olga Olegovna¹, Kuznetsov Kirill Mikhailovich¹,
Tokarev Mikhail Yurievich¹**

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow

Введение

В акватории Кандалакшского залива вблизи Беломорской биологической станции имени Н.А. Перцова на протяжении многих лет проводятся геолого-геофизические исследования, в том числе в рамках практик для студентов МГУ имени М.В. Ломоносова. Основу морских геофизических работ составляют методы высокоразрешающей сейсморазведки, позволяющие детально изучать геологическое строение верхней части разреза, но часто не выявляющие особенностей кристаллического фундамента.

С целью изучения возможности выделения магнитных неоднородностей разреза, в первую очередь связанную с гетерогенностью магнитных свойств фундамента, инициированы магнитометрические исследования.

Зимой 2019 года в акватории Черной губы (Кандалакшский залив Белого моря) проведена опытная детальная наледная магнитная съёмка с использованием магнитометров «ММРОС-1» общей протяженностью профилей около 35 пог. км. Особенности технологии работ позволили обеспечить точность наблюдений ± 10 нТл. Летом 2022 года выполнены гидромагнитные исследования с использованием морского магнитометра «SeaSPY2» на большей площади, чем наледная съёмка, и с повторением её профилей. Среднеквадратическая погрешность морской съёмки составила $\pm 2,5$ нТл при общей протяженности маршрутов ~60 пог. км. Летом 2023 года площадь морских исследований увеличена в ходе работ на смежной площади в проливе Великая Салма. Работы выполнены с использованием отечественного морского продольного градиентометра «MagiMag 300m», приобретенного геологическим факультетом МГУ имени М.В. Ломоносова. Общая протяженность маршрутов съёмки превысила 75 пог. км. Среднеквадратическая погрешность съёмки составила $\pm 1,1$ нТл.

Некоторые аспекты геологического строения пролива Великая Салма

Современное Белое море образовалось в конце плейстоцена после завершения ледникового периода. По сейсмоакустическим данным в разрезе отложений установлено четыре комплекса (архейский акустический фундамент и ледниковые (моренные), послеледниковые и морские

позднечетвертичные образования) [Сорокин и др., 2009; Спиридонов и др., 1980]. Мощность каждого из трех комплексов осадочного чехла может достигать первых десятков метров.

Фундамент представлен плутоно-метаморфической Ругозерско-Энгозерской зоной Беломорского подвижного пояса, являющегося частью Беломорского блока позднеархейской консолидации. Зона имеет сложное неоднородное строение, обусловленное чередованием в плане и разрезе линейных разновеликих полос, сложенных апогабброидными и апоанортозитовыми амфиболитами, кристаллосланцами и плагиомигматитами хетоламбинского подкомплекса с полосами плагиогранитоидов котозерского подкомплекса [Государственная..., 2021]. Поверхность кровли фундамента, как правило, сильно сглажена, а местами имеет блоковое строение [Старовойтов и др., 2018].

В результате палеозойской тектоно-магматической активизации северо-восточной части Фенноскандинавского щита образовались системы лампрофировых даек. На площади исследования несколько таких девонских даек северо-западного простирания известны [Государственная..., 2021].

Наиболее древние из осадочных отложений – это ледниковые (моренные), относящиеся к максимальной стадии Валдайского оледенения (осташковский горизонт, 20–18 тыс. лет назад) и представленные супесями и суглинками, реже глинами. Они содержат обломочный материал местного происхождения (гнейсы, граниты, амфиболиты и т.д.) [Невесский и др., 1977]. Послеледниковый («моренный») рельеф в целом наследует неровности кровли кристаллического фундамента, но с гораздо более высокой амплитудой положительных форм. Все современные возвышенные участки дна соответствуют выступам древнего послеледникового рельефа [Терехина и др., 2017].

В соответствии со справочной информацией о магнитных свойствах перечисленных выше горных пород можно заключить, что источниками магнитных «значимых» аномалий могут являться породы фундамента и моренные отложения. В силу того, что моренные отложения часто приурочены к поднятиям фундамента, различить эти два комплекса по данным магниторазведки без привлечения сейсморазведки сложно.

Магнитометрические работы в заливе Черная губа и проливе Великая Салма

Налетные магнитометрические работы проведены в марте 2019 года по профилям сейсмоакустических исследований, выполненных на учебных практиках в период с 2003 по 2004 год [Широкова и др., 2020]. Съёмка выполнена с использованием протонных магнитометров ММРОС-1 в непрерывном режиме с дискретностью измерений 1 секунда (шаг по профилю составил приблизительно 7 м). Перемещение по профилю производилось на снегоходе. С целью уменьшения магнитного влияния снегохода оператор с магнитометром находились в отдельных прицепных санях. Измерение вариаций геомагнитного поля осуществлялось с использованием специально установленной магнитовариационной станции вблизи площади работ. Магнитометрические работы проведены на 23 профилях, 15 из которых имеют простирание Ю–С (совпадают с сейсмическими профилями), 7 расположены вкрест (секущие) и 1 диагональный профиль имеет простирание ЮЗ–СВ. Диагональный и секущие профили, пройдены для увязки и контроля измерений. Общий объем магнитных измерений составил 34,93 пог. км.

В июле 2022 года на той же площади, но в большем объеме выполнены гидромагнитные измерения (общая протяженность маршрутов ~60 пог. км) с использованием морского магнитометра SeaSPY2 (Marine Magnetics, Канада) (рис. 1). Учет вариаций магнитного поля выполнен по данным постоянно действующей магнитовариационной станции WSE Геофизического центра РАН, расположенной на Беломорской биологической станции

[Soloviev et. Al., 2019]. Среднеквадратическая погрешность морской съемки, оцененная по невязкам в точках пересечения профилей, составила ± 2.5 нТл. Как показало сопоставление результатов наблюдений на общих участках, наледная съемка выполнена со среднеквадратической погрешностью ± 10 нТл.

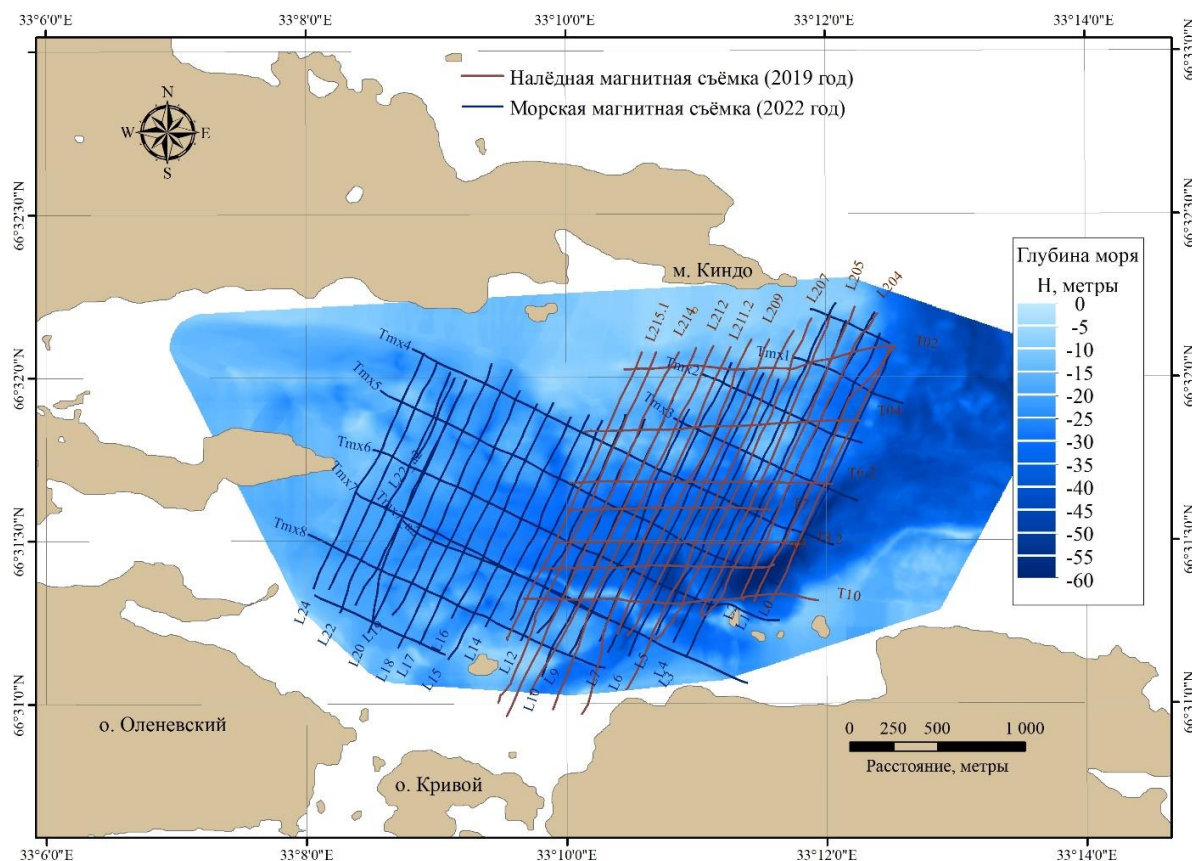


Рис.1. Схема профилей наледной (2019 г.) и морской (2022 г.) магнитных съемок в Черной губе.

В период с 18 по 19 июля 2023 года проведена магнитометрическая съемка отечественным морским продольным градиентометром «MariMag 300m». Работы выполнены совместно с высокоразрешающей сейсморазведкой на НИС «Профессор Зенкевич» по системе параллельных профилей общей протяженностью более 75 пог. км. Магнитометрические измерения проведены по методике дифференциальных гидромагнитных наблюдений [Кузнецов и др., 2023] с использованием двух датчиков, разнесенных на 20 м вдоль траектории движения судна. Для минимизации девиационных помех судна, габаритная длина которого 18,4 м, и уменьшения электромагнитного влияния сейсмического оборудования ближний датчик магнитометра буксировался на удалении 100 м от кормы судна. Сопоставление результатов измерения на участке профиля, пройденном дважды, показали, что среднее расхождение между повторными измерениями составляет 0,5 нТл, максимальная амплитуда расхождения не превышает 3 нТл, а среднеквадратическое расхождение – менее $\pm 0,7$ нТл. Область максимального различия аномального магнитного поля на пикетах 700 – 1300 м соответствует максимальному расхождению в траектории судна. Среднеквадратическая погрешность, оцененная по небольшому количеству точек пересечения, составила $\pm 1,1$ нТл.

Карта аномального магнитного поля, построенная по материалам гидромагнитных съемок 2022 и 2023 годов, показана на рисунке 2. Магнитное поле достаточно амплитудно (более 1000 нТл). В нем присутствуют аномалии разного размера и формы.

Магнитное поле в Черной губе более дисперсное, в нем больше мелких и амплитудных аномалий. В проливе Великая Салма поле более спокойное, амплитудные и малоразмерные аномалии появляются по мере приближения к берегам острова Великий и мыса Киндо, что может быть связано с сокращением глубины моря и уменьшением расстояния до магнитоактивных комплексов.

Как в региональной, так и локальной компонентах аномального магнитного поля отмечаются линеаменты северо-западного простирания, совпадающие по направлению с девонскими дайками и разрывными нарушениями, выделенными на геологических картах [Государственная..., 2021] (Рис. 2).

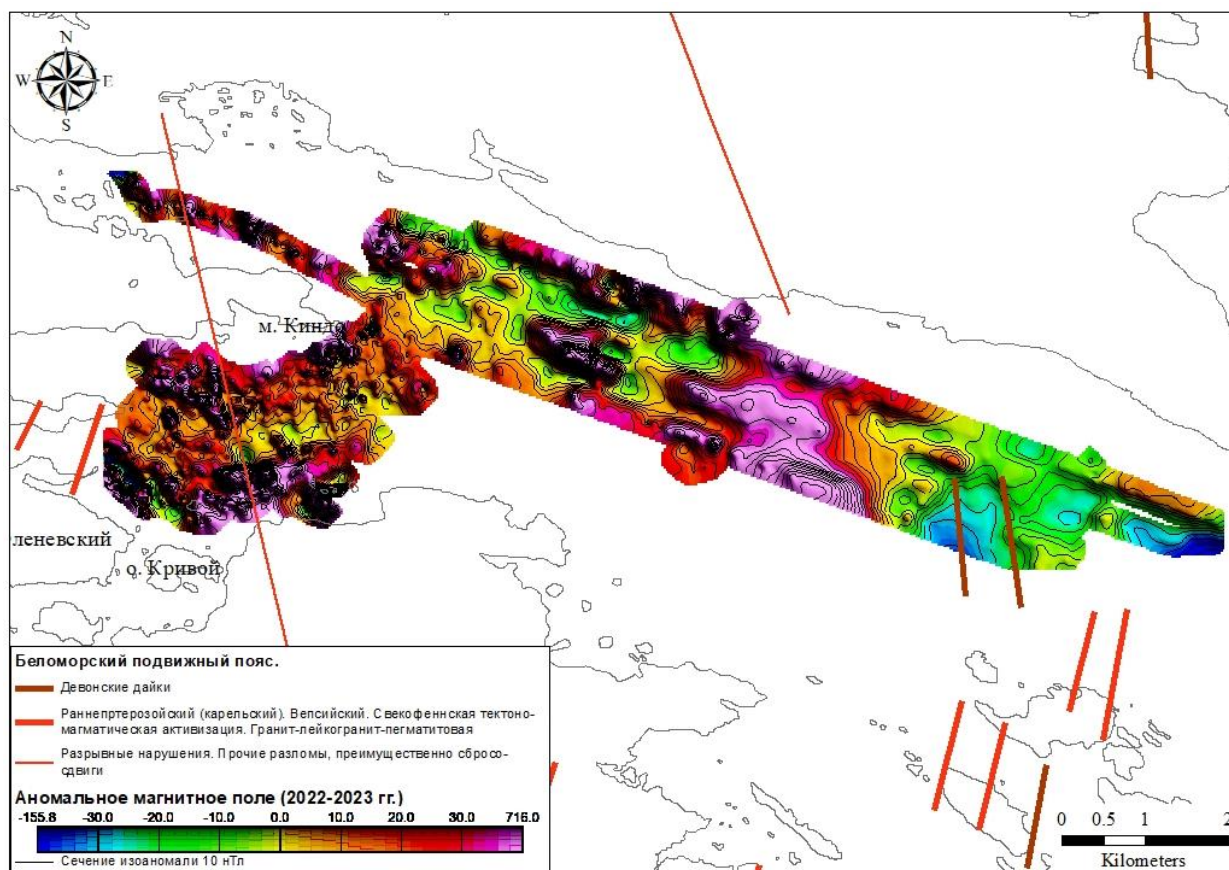


Рис. 2. Аномальное магнитное поле по материалам гидромагнитных съемок 2022 и 2023 годов.

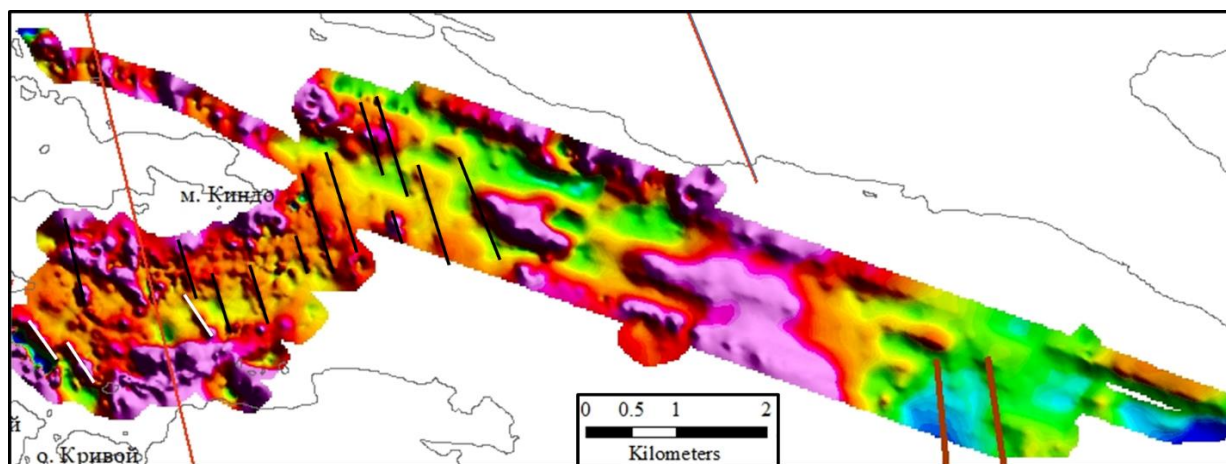


Рис. 3. Линеаменты северо-западного простирания, выделенные в аномальном магнитном поле.

Черные и белые линии – линеаменты, выделенные по аномальному магнитному полю.
Остальные условные обозначения см. на рисунке 2.

Сопоставление локальных аномалий магнитного поля с сейсмическими разрезами в Черной губе показало, что большинство источников аномалий приурочены к моренам. Например, для фрагмента профиля 224 (на рисунке 1 положение профиля близко к положению профилю L20) хорошо видно, что область положительных значений магнитного поля приурочена к обширным моренным отложениям (Рис. 4). В зависимости от сейсмо-геологических условий идентификация источников локальных магнитных аномалий может отличаться.

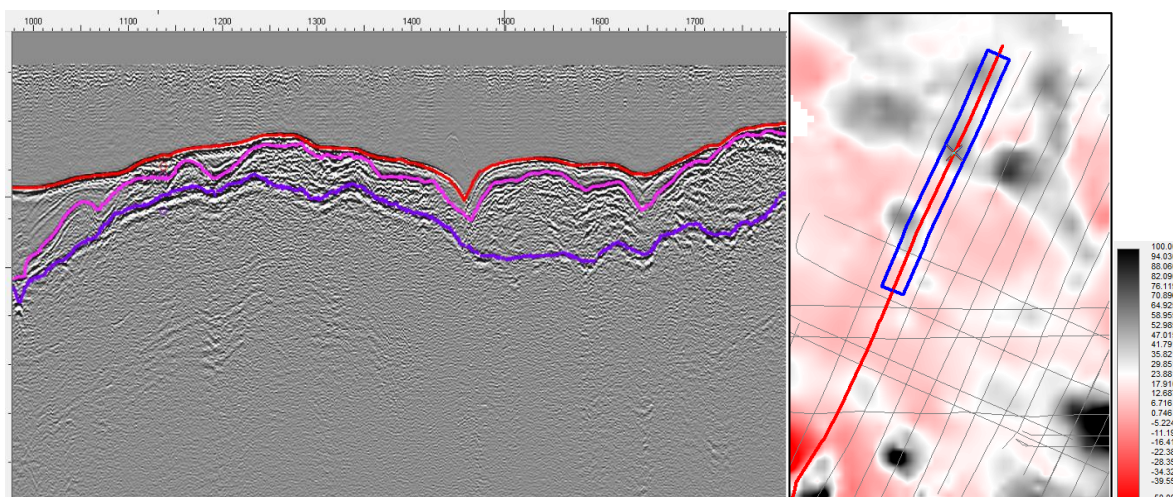


Рис. 4. Сопоставление сейсмического разреза (слева) и положительной аномалии магнитного поля (справа) на фрагменте профиля 224.

Красная линия – рельеф дна, розовая и фиолетовая линии – кровля и подошва моренных отложений. Синий контур на магнитном поле – интервал сейсмического профиля, разрез по которому показан слева.

Выводы

В процессе выполнения магнитометрических работ отработаны все ключевые этапы наледных и морских магнитометрических съемок: подготовка и тестовые лабораторные испытания, выявление девиационной помехи, монтирование и запуск магнитометра на борту морского судна, операции по спуску и подъему заборного оборудования, подбор оптимальных параметров съемки, обработка магнитометрической информации и геолого-геофизический анализ результатов работ.

Магнитометрические материалы еще будут более тщательно анализироваться, предстоит количественная оценка источников выявленных аномалий, но уже сейчас отмечены следующие моменты.

1. Выявлена высокая корреляции дисперсии аномального магнитного поля и возвышенностей рельефа морского дна.
2. Положительные по знаку аномальные области магнитного поля имеют высокую степень связи с моренными отложениями, расположенными на выступах фундамента.
3. Ряд локальных магнитных аномалий формирует линеаментные зоны северо-западного простирания, совпадающие по простиранию с тектоническими нарушениями и палеозойскими дайками.

4. В центральной части площади съемки в проливе Великая Салма есть ряд крупных положительных аномалий, требующих объяснения.

Финансирование

Исследование выполнено в целях реализации Программы развития Московского университета (Соглашение № 195 от 15 сентября 2023 г.) с использованием морского продольного градиентометра MariMag-300m.

Исследование выполнено в рамках проекта «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики», номер договора 5-15-2021, номер ЦИТИС: 121042200088-6.

Список литературы:

1. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Серия Карельская. Лист Q-36-XV, XVI (Лоухи). Объяснительная записка [Электронный ресурс] / М. А. Корсакова, Н. М. Иванов, Г. А. Дударева; Мин-природы России, Роснедра, СЗРГЦ, ГПП «Севзапгеология». – Электрон. текстовые дан. – М.: Московский филиал. – ФГБУ «ВСЕГЕИ». – 2021.
2. Кузнецов К.М., Булычев А.А., Лыгин И.В. Анализ возможностей применения спектрального способа обработки данных дифференциальной гидромагнитной съемки // Гелиогеофизические исследования. – 2023. – Выпуск 38. – С. 46 – 53.
3. Невеский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. – Наука. – Москва. – 1977. – 236 с.
4. Спиридонов М.А., Девдариани Н.А., Калинин А.В. и др. Геология Белого моря // Сов. геология. – 1980. – № 4. – С. 45–55.
5. Старовойтов А.В., Токарев М.Ю., Терехина Я.Е., Козупица Н.А. Строение осадочного чехла Кандалакшского залива Белого моря по данным сейсмоакустики // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. – 2018. – № 2. – С. 81–92.
6. Терехина Я.Е., Токарев М.Ю., Шевченко Н.В., Козупица Н.А. Происхождение подводных поднятий губы Ругозерская и пролива Великая Салма (Кандалакшский залив) // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 4. Геология. – 2017. – № 2. – С. 51-56.
7. Широкова Т.П., Лыгин И.В., Токарев М.Ю., Золотая Л.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Фадеев А.А., Арутюнян Д.А., Любичкая А.В., Шклярчук А.Д. Комплексирование наледных гравиметрических и магнитометрических наблюдений и морской сейсморазведки в Кандалакшском заливе Белого моря // Труды IX Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)". – Том III (III). – ООО ПолиПРЕСС. – Тверь. – 2020. – С. 425–428.
8. Soloviev A., Sidorov R., Grudnev A., Khokhlov A., Dobrovolsky M., Kudin D., Sapunov V., Tzetlin A., Semenov A. Geomagnetic data recorded at Geomagnetic Observatory White Sea (IAGA code: WSE). – ESDB repository. – GCRAS. – Moscow. – 2019. – DOI: 10.2205/WSE-database.

УДК 53.087.45.

Рубрика 37.25.03, 37.25.19, 37.25.23

ТЕЧЕНИЯ В ЧЕРНОЙ ГУБЕ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА

THE CURRENTS IN THE CHERNAYA BAY OF THE KANDALAKSHSKAYA GULF

Иванова Ирина Николаевна¹, Будников Андрей Александрович¹, Левонян Карен Андраникович¹, Сергеев Александр Сергеевич¹

¹*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет*

Ivanova Irina Nikolaevna¹, Budnikov Andrey Aleksandrovich¹, Levonyan Karen Andranikovich¹, Sergeev Alexander Sergeevich¹

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Введение

Характеристики течений в прибрежных зонах представляют интерес для различных научных и хозяйственных сфер жизни. Ряд вопросов, связанных с влиянием приливных течений на формирование рельефа дна, состава донных отложений, развитие тех или иных донных биологических сообществ на сегодняшний день остается открытым [1, 2]. Натурные измерения в небольших заливах и проливах позволяют получить представление о характеристиках течений, исходные данные для верификации результатов численного моделирования, провести анализ влияния движения водных масс на рельеф дна, осадочный слой грунта, распределение донных биологических сообществ.

В работе приводятся результаты натурных измерений в Черной губе Кандалакшского залива в июле 2022 г. при наличии сильных приливов. Исследуются придонное, дрейфовое и приливное течение в разные фазы приливного цикла

Район исследований и методика измерений

Черная губа находится в верхней части Кандалакшский залива. Измерения проводились вблизи Крестовых островов: 61° 24' 07" N, 31° 14' 07" E. Глубины при входе в Черную губу 10—34 м, западная часть губы мелководна. В центре губы расположен остров Оленевский. По обе стороны острова в вершину губы ведут два морских прохода: северный — узкий, стесненный прибрежными отмелями и южный — менее извилистый. Приливное течение входит в губу Чёрная из пролива Великая Салма двумя струями посередине обоих проходов. Отливное течение имеет обратное направление и при выходе в пролив Великая Салма уклоняется к мысу Киндо [3]. Приливы и отливы значительные (перепад уровня до 2 м), чередуются каждые 6 часов. Из-за сложного рельефа дна здесь образуется несколько потоков воды с разными направлениями. Подводный ландшафт в данной области имеет несколько типов: россыпи валунов, песчаное дно с отдельными валунами, илы. Рельеф дна с севера на юг можно разбить на три характерные области: северная наклонная мелководная равнина с грядами и ложбинами, центральная равнина к западу остающаяся достаточно пологой к востоку становящаяся холмистой с существенным ростом глубины в сторону пролива Великая Салма и южная прибрежная равнина с извилистыми грядами и ложбинами.

Натурные измерения проводились в июле 2022 г. с борта НИС «Студент», принадлежащего ББС МГУ с помощью многопараметрических зондов RDCP-600 и RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия), оснащенных датчиками измерения температуры, электропроводности, концентрации растворенного кислорода, мутности, модуля скорости и направления течений. Положение станций, на которых проводились измерения отмечено на рис.1. Изменяемые параметры: температура T (точность/разрешение датчика $\pm 0.05/0.03^\circ\text{C}$), электропроводность S (точность/разрешение датчика $\pm 0,018 \text{ Mc/cm-1}/0,002 \text{ мC/cm-1}$), концентрация растворенного кислорода O_2 (точность/разрешение датчика $< 8 \text{ }\mu\text{моль/л}$ (либо 5% от величины)/ $< 1 \text{ }\mu\text{моль/л}$), мутность Tu (точность/разрешение датчика $\pm 10/0.5 \text{ NTU}$), скорость (точность/разрешение датчика $1\%/0.3 \text{ см/сек}$), направление скорости (точность/разрешение датчика $\pm 5^\circ/0.35^\circ$). Зонд RDCP-600 использовался для многочасовых измерений (12–24 ч) скоростей течений и устанавливался вблизи дна на буйковом подвесе. Зонд позволяет послойно с шагом 1 метр получать величину и направление скоростей течений в каждом слое, начиная с расстояния 2 метра над прибором (высота над уровнем дна самого прибора составляла 0,5 м), дискретность опроса датчиков при этом выбиралась от 10 мин до 1 часа. При помощи зонда RCM 9 LW выполнялось профилирование гидрологических параметров (модуль скорости и направление течений, температура T , электропроводность S_k , мутность Tu , концентрация растворенного кислорода O_2) с шагом 1 м при плавном опускании зонда от поверхности до дна в заранее выбранных точках. При проведении измерений запись значений с датчиков ведется непрерывно, при этом полный цикл записи всех измеряемых параметров составляет 34 секунды. Время измерений для зондирований RCM 9 LW выбиралось так, чтобы данные по выбранным станциям были получены по возможности в разные фазы прилива-отлива.

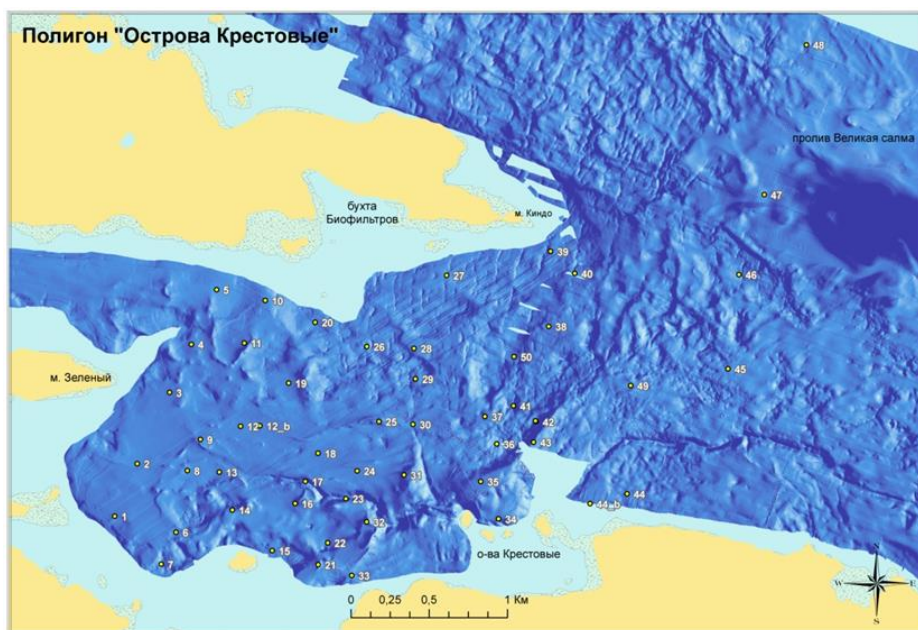


Рис. 1. Полигон с обозначенными станциями зондирования.

Придонные течения в разные фазы прилива

Результаты измерений показали, что значения придонных скоростей находятся в диапазоне от 1,2 до 16,3 см/с.

В ходе исследования было обнаружено, что течение в придонном слое может менять направление в зависимости от фазы прилива. При анализе полученных данных во время натурных измерений можно заметить высокую изменчивость течения в разные фазы прилива.

Во время прилива наблюдается общая динамика перемещения жидкости из пролива Великая Салма на запад вглубь Черной губы, а в период отлива воды выходит из губы, и отливное течение имеет обратное направление.

В то же время есть станции, на которых не удалось зафиксировать изменение направления течения (станции 3, 4, 5, 11, 19, 40).

Для теоретической оценки скорости течения вблизи дна в приближениях стационарности и горизонтальной однородности течения использовалось выражение:

$$U = \left(\frac{hg\Delta\rho h i_s}{\rho C} \right)^{1/2} \quad (1)$$

где h – вертикальный размер течения, соответствующий уровню максимума градиента скорости в слое смешения потока с вышележащими водами; g – ускорение свободного падения; $\Delta\rho$ – средняя по интервалу высот над уровнем дна $z=0 \div h$ разность плотностей жидкостей в потоке и над ним; i_s – уклон дна; C – суммарный коэффициент сопротивления у дна и на высоте h .

Придонные течения в Черной губе Кандалакшского залива подвержены влиянию приливов, что приводит к изменениям в их направлении и скорости. Таким образом, учет фаз прилива является неотъемлемой частью моделирования придонных течений и позволит получить более точные результаты.

Теоретическая оценка придонных течений с использованием выбранной формулы продемонстрировала согласованность с наблюдаемыми величинами скорости, дальнейшая работа должна включать в себя учет фаз прилива для более точного моделирования и оценки придонных течений в Черной губе Кандалакшского залива. Это позволит более полно и точно представить структуру и динамику придонных течений.

Поверхностные течения в разные фазы прилива

Поверхностное течение рассматривалось в слое глубиной до 6 метров. Наиболее интересными являются моменты разворота направления течения — конец и начало фазы прилива и отлива, а также расчет ожидаемых скоростей в моменты середины фаз цикла – большая вода и малая вода, когда ожидаемое влияние скорости прилива или отлива наименьшее.

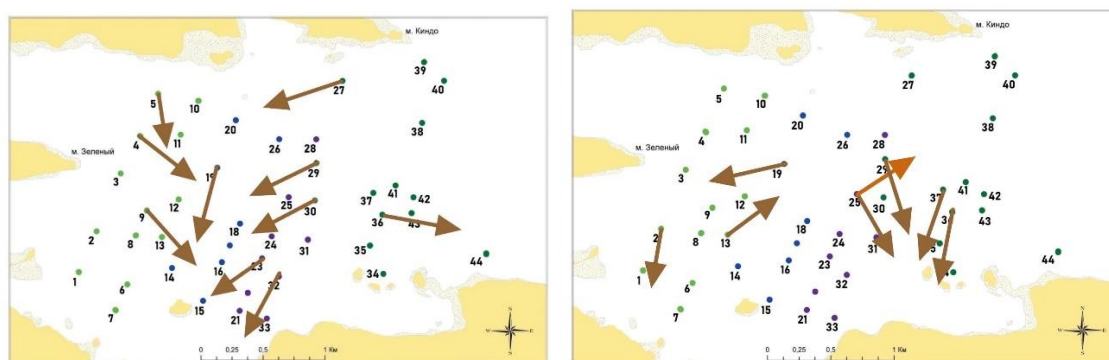


Рис. 2. Направление поверхностных течений во время большой воды (а), и во время малой воды (б).

Общая картина поверхностного течения в случае большой и малой воды достаточно сложная, так как в рассматриваемых случаях особенно большую роль играют топография дна, близость береговой линии и русла реки Нельма, сгонно-нагонные процессы. Тем не менее, для малой воды прослеживается общая тенденция разворота поверхностного течения в сторону востока, ко входу в залив, тогда как во время большой воды наблюдается тенденция западного направления.

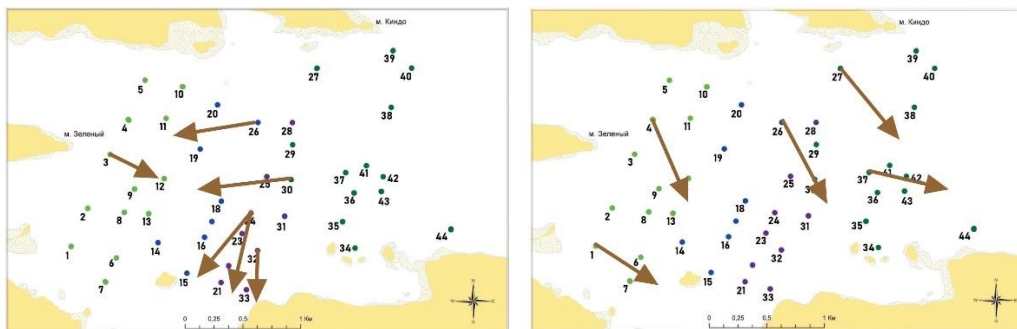


Рис. 3. Направление поверхностных течений во время середины прилива и середины отлива.

Во время пика скоростей прилива поверхностное течение имеет в основном ожидаемое направление: скорости направлены от пролива Великая Салма. Для мелководных участков близ берега направление поверхностных течений противоположно, однако данные для этого случая представлены лишь одним измерением и могут быть обусловлены локальной топографией дна. Местам с наибольшей глубиной в целом свойственно сохранение общих направлений скоростей и следование ожидаемому поведению в зависимости от фазы цикла.

Во время середины отлива наблюдается наибольшее ожидаемой картины. Во всех измеренных точках, попавших на эту фазу цикла, наблюдаются направления в сторону открытого моря.

В целом, в поверхностном слое значения скоростей менялись в интервале 6-50 см/сек. Во время пика прилива скорость приближается к 50 см/с, в то время как во время большой воды скорость падает в два раза от максимальной.

Основные результаты и обсуждение

Наиболее интенсивные движения наблюдались в верхнем 10-метровом слое в центральной части полигона, которая в наибольшей степени подвержена ветровому воздействию, а также в придонном слое с максимумом течения на высоте от 2 до 12 метров от дна в мелководных прибрежных зонах и в восточной, наиболее глубоководной части. Максимальные скорости придонных течений в нижнем полуметровом слое были зарегистрированы в центральной и восточной частях полигона. Величины этих скоростей лежали в диапазоне от 10 до 16,6 см/сек. Было обнаружено, что значения придонных скоростей (0,5 м от дна) находятся в диапазоне 0,01–0,16 м/с., что в целом совпадает с рассчитанными по [4] средними скоростями для гравитационного потока, лежащего ниже термоклина. Максимальные значения скоростей придонного течения чаще приходится на точки, где глубина превышает 30 м. Максимальные значения измеренных скоростей были получены в приповерхностном слое или вблизи термоклина. Значения скоростей могут меняться в различные фазы прилива.

Проведено сравнение теоретически рассчитанной дрейфовой скорости и полученной в результате измерений при значительном влиянии приливных явлений. Оценены скорости

приливных течений, построены карты с указанием направлений распространений поверхностных течений для разных фаз приливного цикла.

Список литературы

1. Я. Е. Терехина, М.Ю. Токарев, Н.В. Шевченко, Н.А. Козупица. Происхождение подводных поднятий губы Ругозерская и пролива Великая Салма (Кандалакшский залив) //Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. Изд-во Моск. ун-та (М.). – 2017 – №. 2 – С. – 51–56
2. Я. Е. Терехина, М. Ю. Токарев, В. Е. Галаев. Геостатистический анализ гидроакустических наблюдений в проливе Великая Салма // Геофизика, издательство М.: Ред.-изд. центр ЕАГО; (Тверь: Полипресс), № Спецвыпуск. – 2021. – С. –35–39.
3. А. В. Зимин. Субприливные процессы и явления в Белом море. –2018.
4. Б. И. Самолюбов. Плотностные течения и диффузия примесей М. – 2007.

УДК 551.89; 551.4.07; 551.4.04; 551.435

Рубрика 38.47.00

РИТМЫ ПРИБРЕЖНЫХ ЭОЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ

THE RHYTHMIC PATTERNS OF AEOLIAN PROCESSES ON THE WHITE SEA COAST IN THE HOLOCENE

Репкина Татьяна Юрьевна^{1,2}, Леонтьев Пётр Александрович², Кублицкий Юрий Анатольевич², Орлов Александр Владимирович², Вахрамеева Елена Анатольевна³, Лосюк Галина Николаевна³, Якимова Карина Сергеевна⁴, Комагорова Мария Александровна⁵, Крехов Алексей Константинович⁶, Гуринов Артём Леонидович^{1,7}, Вяткин Егор Дмитриевич⁸, Луговой Николай Николаевич^{8,1}, Шилова Ольга Сергеевна⁸

¹ *Институт географии РАН, Москва*

² *РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург*

³ *Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия*

⁴ *Институт океанологии РАН, Москва*

⁵ *Минералогический музей им А.Е. Ферсмана РАН, Москва*

⁶ *СПбГУ, Физический факультет, Санкт-Петербург*

⁷ *НИУ ВШЭ, факультет географии и геоинформационных технологий, Москва*

⁸ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва*

Repkina Tatiana Yurievna^{1,2}, Leontiev Piotr Alexandrovich², Kublitskiy Yuriy Anatolievich², Orlov Alexander Vladimirovich², Vakhrameeva Elena Anatolievna³, Losyuk Galina Nikolaevna³, Yakimova Karina Sergeevna⁴, Komagorova Mariya Aleksandrovna⁵, Krekhov Alexey Konstantinovich⁶, Gurinov Artem Leonidovich^{1,7}, Vyatkin Egor Dmitrievich⁸, Lugovoy Nikolay Nikolaevich^{8,1}, Shilova Olga Sergeevna⁸

¹ *Institute of Geography, RAS, Moscow*

² *Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg*

³ *N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch, RAS, Arkhangelsk*

⁴ *Shirshov Institute of Oceanology, RAS*

⁵ *Fersman Mineralogical Museum, Moscow*

⁶ *St. Petersburg State University, Faculty of Physics, St. Petersburg*

⁷ *Higher School of Economics, the Faculty of Geography and Geoinformation Technology, Moscow*

⁸ *Faculty of Geography of LMSU, Moscow*

Введение

Эоловые процессы - один из важнейших факторов морфолитогенеза береговой зоны Мирового океана. Ветропесчаный поток выносит наносы в тыловую часть пляжа, где образует «первичные прибрежные дюны», в том числе авандюны. Движение сухого песка путем сальтации, качения или во взвешенном состоянии начинается в зависимости от размеров и минерального состава зерен при скоростях ветра от 4-5 до 10-11 м/с [Выхованец, 1993, Сафьянов, 1996 и др.]. При значительных скоростях ветра часть песков может быть вынесена за пределы береговой зоны (БЗ). Дальность «ближнего» эолового переноса изменяется в зависимости от местных условий от сотен метров до нескольких километров [Сафьянов, 1996]. Песок, вынесенный с пляжей и «первичных дюн», служит источником питания «вторичных дюн» [Ruz, Hesp, 2014], а также попадает в прибрежные водоемы и на поверхности болот и маршей, где образуются слоистые органо-минеральные отложения. Полагают, что наиболее крупные частицы могут достигнуть удаленных участков побережья во время сильных зимних штормов при наличии на берегу снежного покрова [Vjögsk, Clemmensen, 2004]. Таким образом, содержание и состав минеральных частиц в отложениях прибрежных водоемов и террас, также как и внутреннее строение дюн, могут быть индикаторами ритмов эоловых процессов, и, следовательно, косвенными признаками изменения режима ветров. На берегах Белого моря ритмы активизации и затухания прибрежных эоловых процессов до недавнего времени были изучены только на единичных участках (см. обзор [Репкина, Яковлева, 2023]). Наши исследования позволили в общих чертах реконструировать ритмы прибрежного эолового морфолитогенеза на нескольких ключевых участках восточного побережья Белого моря, отличавшихся в голоцене условиями развития береговых и эоловых процессов, в том числе динамикой относительного уровня моря (рис. 1). В работе представлена краткая интерпретация результатов полевых геолого-геофизических и аналитических исследований.

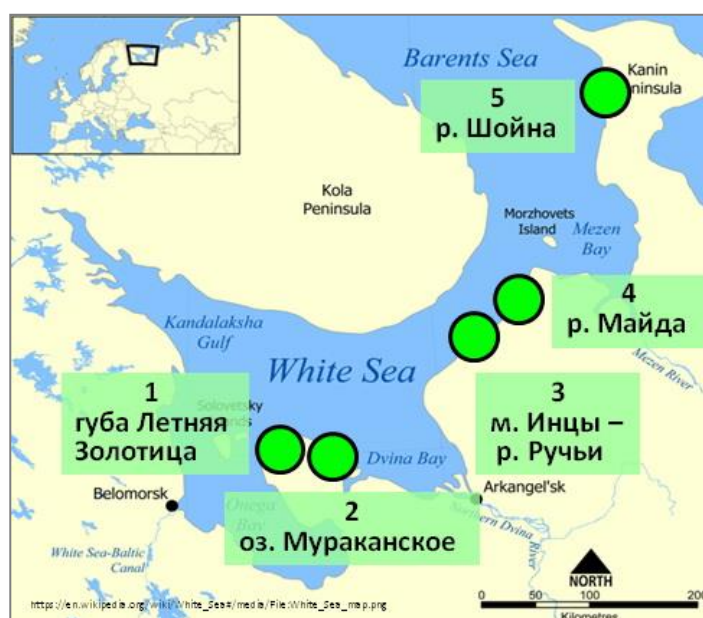


Рис 1. Положение участков исследования

Материалы и методы

Методика исследования включала совместное использование геоморфологических, геофизических (георадиолокация), палеолимнологических, геодезических (съёмка БПЛА и

DGPS), аналитических и геохронологических (радиоуглеродное и OSL датирование) методов. Это позволило сопоставить внутреннее строение современных и реликтовых форм прибрежного эолового рельефа с литолого-стратиграфической последовательностью донных осадков прибрежных водоёмов, расположенных в зоне ближнего эолового переноса.

Геоморфологические исследования включали дешифрирование разновременных космических и аэро- снимков, профилирование прибрежных террас и эоловых форм, а также анализ строения и динамики современной береговой зоны.

Георадиолокационное профилирование было выполнено при помощи георадаров Zond-12e, ОКО и антенн с частотой от 50 до 500 МГц. Это позволило получить характеристики разреза эоловых и подстилающих отложений на глубину до 20 м. Были изучены также котловины озёр Мураканского (участок 2) и Средняя Треть (участок 3). Обработка радарограмм выполнялась в ПО Prism 2.5-2.7, RadExplorer 1.42 и GeoScan32. Интерпретация радарограмм проведена на основе анализа волновой картины по методике [Старовойтов, 2008] с учетом данных бурения и описания разрезов.

Тахеометрическое профилирование было выполнено с помощью DGPS PrinCe i50, аэрофотосъемка – квадрокоптерами DJI Phantom 4 Pro v2.0. и DJI Mini2. В результате были составлены ортофотопланы и цифровые модели местности. Они используются для высотной привязки георадарных профилей, расчета объемов эоловых форм и составления карт морфодинамики рельефа.

Бурение донных отложений озёр и болот выполнено с помощью русского торфяного бура (диаметр 5 см, длина керн 1 м). Бурение сопровождалось литолого-стратиграфическим описанием кернов и отбором образцов на аналитические исследования и радиоуглеродное датирование. Всего для выявления ритмов прибрежных эоловых процессов были изучены керны 6 скважин из донных отложений озёр Петрушина Ляга (участок 1), Мураканского и Средняя Треть, а также более 10 разрезов отложений дюн, прибрежных террас и болот.

Аналитические исследования включали диатомовый и гранулометрический анализы, определение валового содержания органического вещества (ОВ), минералогический анализ тяжелой фракции (участки 1, 5), анализ окатанности кварцевых зерен (участок 5). Для донных отложений озёр Мураканского и Средняя Треть определена массовая доля общего и органического углерода и азота.

Радиоуглеродное датирование образцов проведено в Лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана, Лаборатория геохимии изотопов и геохронологии ГИН РАН, Laboratorium Datowań Bezwzględnych (Польша), Лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии ИГ РАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США). Датирование методом OSL - в Лаборатории оптически стимулированной люминесценции ФГБУ «ВСЕГЕИ».

Результаты

Северо-восточный берег Онежского полуострова. Губа Летняя Золотица - глубоко врезанный в сушу залив, открытый преобладающим ветрам. Конфигурацию его берегов и основные черты рельефа дна определяет строение кровли морены последнего оледенения. В результате быстрого (~2.8–2.9 мм/год) понижения относительного уровня моря (ОУМ) очертания берегов губы перестраиваются, а древние береговые линии (ДБЛ) утрачивают литодинамическую связь с береговой зоной [Репкина и др., 2020].

Современные берега губы преимущественно аккумулятивные. В тыловой части пляжей (т.н. зоне дефляции [Сафьянов, 1996]) и на авандюнах преобладают среднезернистые пески с включением мелко- и крупнозернистых и редкими зернами гравия. Деятельность эоловых процессов интенсивна в прибрежной полосе шириной ~500 м, где сформировались поверхность эолового выравнивания и активная дюна. С удалением от берега эоловые отложения становятся тоньше - в разрезе дюны господствуют средне- и мелкозернистые пески, в незначительных количествах появляется крупный алеврит, а гравий отсутствует. В тылу дюны ДБЛ закреплены сосновым лесом. Признаки современного переувлажнения здесь не выявлены. Береговая линия среднеголоценовой трансгрессии Тапес (~8.2–5.8 тыс. кал.л.н.) удалена от современного берега на ~1 км. Она включает палеолагуна Петрушина Ляга (урез - 17.1 м, порог стока - 16 м н.у.м.), отчлененную переувлажненным песчаным баром. Эоловые отложения по гранулометрическому составу сходны с отложениями современной авандюны и перекрывают более грубые прибрежно-морские пески.

В котловине палеолагуны Петрушина Ляга торф с возрастом подошвы ~4.8-4.5 тыс. кал.л.н. залегает на разнозернистых прибрежно-морских песках с гравием. В нижнем интервале торфа (160-173 см; ~4.5-1.6 тыс. кал.л.н.) быстрое и равномерное уменьшение доли песка (33-16%) сопровождается увеличением доли крупного алеврита (54-69%). Выше по разрезу содержание песка резко сокращается (2-4%). Вероятно, поступление песка с ближним эоловым переносом уменьшалось вслед за удалением котловины палеолагуны от БЛ и практически прекратилось ~1.6 тыс. кал.л.н. Исходя из скорости послеледникового поднятия, БЛ находилась в это время примерно в ~500 м от котловины, что соответствует ширине полосы, подверженной интенсивному воздействию прибрежных ветров на современных берегах. Более короткие ритмы эоловой активности в отложениях оз.Петрушина Ляга не прослеживаются. В условиях формирования рельефа береговой зоны на ледниковых отложениях минералогический анализ не позволяет однозначно определить источник (эоловый перенос, поверхностный сток) поступления наносов в котловину озера.

Северо-восточные берега Онежского полуострова (Летний берег) развиваются на ледниковом субстрате в условиях высокой волновой нагрузки [Репкина и др., 2019]. На аккумулятивных участках берега в зоне дефляции пляжей, на авандюнах и современных террасах доминируют среднезернистые пески с включением мелкозернистых песков. Вдоль берега гранулометрический состав изменяется незначительно. Иногда преобладающей фракцией (до 60%) становятся мелкозернистые пески, а на участках, открытых наиболее сильным ветрам, в наносах активного слоя авандюн появляются крупнозернистые пески (не более 10%). В строении прибрежных террас, как и на северо-западе полуострова, выделяются поверхность эолового выравнивания и активная дюна. Ширина прибрежной зоны активного переувлажнения изменяется в зависимости от ориентировки берега к преобладающим ветрам от 100 до 500 м. На поднятых террасах береговые валы и дюны преимущественно залесены, однако наличие дефляционных котловин и изменения растительного покрова указывают на неоднократную реактивацию эоловых процессов.

Сложная переувлажненная коса, отгородившая палеолагуна оз. Мураканского (урез 6.9 м н.у.м., протяженность 6.3 км, ширина -3.3-1.8 км), образовалась ~8.4–3.9 тыс. кал.л.н. в условиях быстрого повышения ОУМ до 9.5-10.5 м (~8.4-7.4 тыс. кал.л.н.), незначительных колебаний уровня на высотах 8-8.5 м (~7.4-6.0 тыс. кал.л.н.) [Kublitskiy et al., 2023] и его последующего понижения со скоростью ~1.3-1.9 мм/год [Репкина и др., 2019]. Взаимное расположение валов и дюн, а также их внутреннее строение на георадарных профилях позволяют выделить не менее четырех этапов перестройки и переувлажнения косы.

Время активизации эоловых процессов оценено по изменению содержания песка в кернах скважин, пробуренных на расстоянии 1.7-1.8 км от образованного косой берега озера в его западной (МТ3) и восточной (МТ2) котловинах [Kublitskiy et al., 2023]). Возраст рассчитан

исходя из средней скорости накопления различных литологических разностей, установленной по данным радиоуглеродного датирования. Торф, образовавшийся на дне осушенного озера во время регрессии раннего голоцена (~9.4-8.4 тыс. кал.л.н.), содержит пески от мелко- до крупнозернистых (2-10%), а в ряде интервалов - гравий (3%). Изменения гранулометрического состава минеральной фракции позволили выделить этапы большей интенсивности эоловых процессов (~9.3-8.7, с максимумом ~8.8 тыс. кал.л.н.) и относительного затишья (~8.4 тыс. кал.л.н.), которое предшествовало затоплению котловины водами трансгрессии Тапес.

Во время максимума трансгрессии Тапес озеро представляло собой открытую лагуну, которую постепенно отчленяла коса. На дне лагуны накапливались алевриты. В западной котловине они формировались до ~7.4-7.0, а в восточной, дольше сохранявшей связь с морем, - до ~6.4-6.0 тыс. кал.л.н. [Kublitskiy et al., 2023]. Изменение содержания песка (0.5-7% на западе и 1-10% - на востоке озера) было связано, по-видимому, как с режимом волн и течений, так и с эоловым выносом с растущих кос. Однако наши данные не позволяют разделить эти факторы. В интервале ~7.4-4.5 тыс. кал.л.н. в западной котловине озера в условиях ослабленной циркуляции накапливались преимущественно органогенные отложения с морским и переходным комплексами диатомей. Увеличение в этих осадках содержания песков (до 7-9%) можно соотнести с усилением ветров (~6.4-5.9 тыс. кал.л.н.). Эпизоды значительного (до 10-20% минеральной фракции) поступления песков в озеро после его изоляции от моря связаны с переиванием косы и не одновременны в западной (~4.2-4.1 и ~1.6-0.7 тыс. кал.л.н.) и восточной (~3.9-3.1 и после ~2.0 тыс. кал.л.н.) котловинах. Это может быть объяснено сочетанием локальных условий. Отметим, что в среднем и позднем голоцене с эоловым переносом в озеро поступали преимущественно мелкозернистые, реже - среднезернистые пески, что свидетельствует, по-видимому, о меньшей, чем в раннем голоцене силе ветров.

В районе д. Яреньги, в 25 км от оз. Мураканского, дефляция прибрежных террас и дюн активизировалась позже ~0.8-0.55 тыс. кал.л.н., а в последние десятилетия в результате антропогенных нарушения растительного покрова и рельефа стала особенно интенсивной [Репкина и др., 2022].

Восточный берег пролива Горло – район с сильными ветрами и крайне незначительной (≤ 0.5 мм/год) скоростью понижения ОУМ. Как и на Онежском полуострове, конфигурацию берегов контролирует положение моренных гряд последнего оледенения. Однако длительные (около ~9.5 тыс. кал.л.) колебания ОУМ на уровне близком к современному или незначительно выше него [Шилова и др., 2022], быстрый размыв берегов [Невесский и др., 1977] и присутствие в береговых уступах «подморенных» позднелепистоценовых песков, привели к накоплению в БЗ значительных запасов наносов и образованию разнообразных и разновозрастных форм прибрежного эолового рельефа.

На участке между устьями рек Инцы и Ручьи были датированы несколько эпизодов активизации прибрежных эоловых процессов. Озеро Средняя Треть (урез - 7.3 м, порог стока - ~6.2 м н.у.м., диаметр ~1 км) расположено в настоящее время в ~200 м от быстро отступающего морского берега, на поросшей кустарником приморской тундре. Котловина озера впервые попала в зону ближнего эолового переноса в начале трансгрессии Тапес (~9.4 тыс. кал.л.н.) из-за повышения ОУМ и быстрого разрушения берега [Репкина и др., 2023]. Во время максимума трансгрессии (~9.1 тыс. кал.л.н.) и последующей стабилизации уровня на ~5 м н.у.м. на приморском борту котловины формировались слоистые органо-минеральные отложения, а в центре котловины и на южной периферии озера - гиттия с включениями песка. После понижения ОУМ ~6.7-6.3 тыс. кал.л.н. литодинамическая ситуация стала близка современной - на приморском борту котловины озера накапливаются мелко- и среднезернистые пески, интенсивно поступающие с пляжей, а на остальной части котловины

- гиттия и илы, с незначительным содержанием песчаных зерен. Ширина зоны интенсивного поступления песков из БЗ около 500 м. Следующий этап активизации прибрежных эоловых процессов, судя по датам из отложений низких морских террас, перекрытых дюнами, был связан с незначительным повышением ОУМ в интервале позже ~4.3 и ранее ~2 тыс. кал.л.н. [Репкина и др., 2019].

В устье р. Майды в результате разгрузки мощного потока наносов на правом берегу реки образовалась приустьевая коса шириной 600-800 м с четырьмя реликтовыми авандюнами. Древние дюны частично закреплены травянистой растительностью, плоская поверхность эолового выравнивания между ними преимущественно не задернована, перекрыта отмосткой. Эоловые пески залегают на горизонтально- и наклонно-слоистых морских песках с включениями более крупных обломков. С удалением от берега внутренне строение эоловых отложений на георадарных профилях становится более сложным. В основании горизонта эоловых песков видны древние фрагменты дюн с иным характером слоистости. По результатам датирования и диатомового анализа органо-минеральных отложений палеолагуны, расположенной в тылу приустьевой косы, эоловые процессы активизировались позже ~3.8-3.5 тыс. кал.л.н., когда ОУМ приблизился к современному. Современный этап активизации эоловых процессов начался на разных участках берега в интервале ~0.9-0.5 тыс. кал.л.н.

На Канинском берегу Белого моря, между устьями рек Месна и Кия, в условиях чрезвычайно сильных ветров, достаточного количества наносов, поступающих с вдольбереговыми потоками, и незначительного (~1 мм/год за последние ~2 тыс. кал.л.) понижения ОУМ сформировались обширные поля трансгрессивных дюн и реликтовых авандюн [Ruz, Несп, 2014]. Полевыми, дистанционными и аналитическими методами было изучено трансгрессивное дюнное поле на левобережье р. Шойны протяженностью вдоль берега ~4 км при ширине ~1.5 км. На георадарных профилях здесь выделяются 3-4 горизонта эоловых песков, различных по залеганию, что говорит о неоднократной реактивации дюн. Анализ разновременных космических и аэрофотоснимков показал, что в 1976-2022 гг. дюны чрезвычайно быстро (140-200 м/год) смещались в сторону суши [Вяткин, Репкина, 2022]. Из-за ежегодной перестройки возраст дюн по результатам датирования методами ОСЛ и АМС является современным. По гранулометрическому составу (мелко- и среднезернистые пески) отложения дюн и зоны дефляции морских пляжей практически идентичны. Минералогический анализ и исследование морфоскопии кварцевых зерен подтвердили, что источником питания дюн является наносы пляжа. Время активизации прибрежных эоловых процессов (~2.3-2.0, ~1.1-0.9 и позже ~0.7-0.6 тыс. кал.л.н.) установлено методом радиоуглеродного датирования органических прослоев из толщи органо-минеральных отложений заболоченной лагуны, расположенной в тылу дюнного массива.

Выводы

В современных условиях восточного побережья Белого моря ширина зоны интенсивного воздействия прибрежных ветров и ближнего эолового переноса песков изменяется от 0.1 до 1.5 км. На большем расстоянии от берега поступление эоловых песков в водоемы-палеоархивы связано с переувлажнением «вторичных» дюн и прибрежных террас.

Прибрежные водоемы смещаются относительно зоны ближнего эолового переноса (попадают в нее или выходят из нее) в результате изменения режима ветров, относительно уровня моря, а также размыва или проградации берега.

Выявлены ритмы активизации прибрежных эоловых процессов за последние ~9.4 тыс. кал.л. Они демонстрируют значительную пространственную и временную изменчивость. Как правило, первый на каждом из участков этап активизации был связан с повышением

относительного уровня моря во время голоценовой трансгрессии и/или его стабилизацией на уровне, близком современному. Начало текущего этапа (позже ~0.9-0.5 тыс. кал.л.н.) в ряде случаев совпадает с началом МЛП (~1350-1850).

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 22-27-00499.

Список литературы:

1. Выхованец Г.В. Эоловый процесс на морском берегу // Одесса: Изд-во “Астропринт”, 2003. 368 с.
2. Вяткин Е.Д., Репкина Т.Ю. Динамика дюнного массива на левобережье реки Шойны // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 54-59. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-54-59.
3. Невеский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.
4. Репкина Т.Ю., Зарецкая Н.Е., Шилова О.С. и др. Юго-восточный берег Горла Белого моря в голоцене: рельеф, отложения, динамика // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 6. Спб.: ААНИИ, 2019. С. 146–153.
5. Репкина Т.Ю., Кублицкий Ю.А., Леонтьев П.А. и др. (2023). Изменение относительного уровня Белого моря в позднеледниковье – раннем голоцене (восточный берег пролива Горло, озеро Средняя Треть) // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 4 (в печати).
6. Репкина Т.Ю., Луговой Н.Н., Гуринов А.Л., Романенко Ф.А. Антропогенные изменения эоловых процессов на берегах Белого моря // Изв. РАН. Серия географическая, 2022. Т. 86. № 6. С. 1046–1062.
7. Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А., Зарецкая Н.Е., Кублицкий Ю.А., Леонтьев П.А., Шилова О.С., Беличенко А.Е., Архипов В.В., Яковлева А.П. Динамика западного берега Унской губы (Летний берег Белого моря) в голоцене и его заселение // Материалы XXIII Международн. научн. конф. (Школы) по морской геологии “Геология морей и океанов”. Т. 3. Москва: ИО РАН, 2019. С. 212–216.
8. Репкина Т.Ю., Романенко Ф.А., Лудикова А.В., Зарецкая Н.Е. Северо-западные берега Онежского полуострова Белого моря в голоцене: условия развития, динамика, хронология // Известия РАН. Серия Географическая. 2020. Том 84. № 6, С. 888-904; DOI: 10.31857/S2587556620060096
9. Репкина Т.Ю., Яковлева А.П. Эоловый рельеф побережья Белого моря: типизация и распространение // Океанология. 2023, том 63, № 5, с. 813–823. DOI: 10.31857/S0030157423050155, EDN: DAXREQ.
10. Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов / Г.А.Сафьянов. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 400
11. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. М.: Издательство МГУ, 2008. 192 с.

12. Шилова О.С., Зарецкая Н.Е., Репкина Т.Ю. Голоценовые отложения юго-восточного побережья Горла Белого моря: новые данные диатомового и радиоуглеродного анализов // Докл. РАН. 2019. Т. 488. № 6. С. 661–666.
13. Björck S., Clemmensen L. Aeolian sediment in raised bog deposits, Halland, SW Sweden: A new proxy record of Holocene winter storminess variation in southern Scandinavia? *Holocene*. 14. 2004. 677-688. Doi: 10.1191/0959683604hl746rp.
14. Kublitskiy Yu., Repkina T., Leontiev P. et al. Reconstruction of relative sea-level changes based on a multiproxy study of isolated basins on the Onega Peninsula (White Sea, northwestern Russia) // *Quaternary International*. 2023. V. 644–645. P. 79–95.
15. Ruz M.-H., Hesp P.A. Geomorphology of high-latitude coastal dunes: a review // *Geological Society, London, Special Publications*. 388, 2014. P. 199-212 <https://doi.org/10.1144/SP388.17>.

УДК 550.8.055

Рубрика 38.15.15

НОВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА ГРЯЗЕВУЛКАНИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ ГИДРАТОНОСНОЙ СТРУКТУРЫ «МГУ» (ОЗЕРО БАЙКАЛ)

NEW EVIDENCE OF MUD VOLCANIC ORIGIN OF THE «MSU» HYDRATE-BEARING STRUCTURE (LAKE BAIKAL)

Немченко Нина Валерьевна¹, Соловьёва Марина Андреевна¹, Видищева Олеся Николаевна¹, Уголькова Ева Александровна¹, Кудяев Артур Алиевич¹, Исаходжаев Фархад Бахтиерович², Голощанов Григорий Александрович², Ахманов Григорий Георгиевич¹

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

² *Апрелевское отделение ФГБУ ВНИГНИ, Апрелевка*

Nemchenko Nina Valerievna, Solovyeva Marina Andreevna¹, Vidishcheva Olesya Nikolaevna¹, Ugolokova Eva Alexandrovna¹, Kudaev Arthur Alievich¹, Isakhodzhaev Farkhad Bakhtiyerovich², Goloshchapov Gregorii Aleksandrovich², Akhmanov Grigorii Georgievich¹

¹ *M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *Federal State Budgeted Institution «Russian Research Geological Oil institute», Aprelevka Branch of VNIGNI, Aprelevka, Moscow Region*

Введение

Подводная гидратоносная структура, получившая название «МГУ», обнаружена 29 июля 2018 г. в ходе геолого-геофизической экспедиции проекта Class@Baikal (Байкальский плавучий университет) на дне центральной котловины озера Байкал, на траверсе пролива Ольхонские Ворота, на глубине 1380 м, в районе с координатами 52°52 с.ш., 107°07 в.д [Ахманов и др., 2018]. Структура имеет сложное строение. В целом, это многовершинная, субизометричная в плане возвышенность, с диаметром основания около 600 м, расположившаяся на разломе «Гидратный». Структура состоит из четырех небольших (высота 5–10 м) подводных холмов, один из которых сформирован на поднятом крыле тектонического уступа, а три находятся на опущенном крыле субпараллельно подножию уступа. Для уточнения морфологии структуры и изучения её внутреннего строения была выполнена серия сейсмоакустических профилей в трёх диапазонах частот. Полученные данные демонстрируют характерную для других гидратоносных структур озера Байкал хаотическую волновую картину в пределах возвышенности и акустически прозрачный вертикальный подводный канал под ней, плавно расширяющийся с глубиной. К этому каналу примыкают участки с повышенной амплитудой отражённого сигнала, являющиеся признаками повышения содержания газа в осадках [Ахманов и др., 2018; Vidishcheva et al., 2021]. На протяжении нескольких экспедиций Class@Baikal структура исследовалась. В данной работе приведена площадная

литологическая характеристика структуры на основании исследований 21 станций донного пробоотбора. В работе приведены результаты лабораторных исследований состава и свойств разгружающихся газов и органического вещества донных осадков. А также освещены литологические свидетельства грязевулканической природы структуры.

Литологическая характеристика

Литология осадков в разных частях структуры, на трёх возвышенностях опущенного блока и возвышенности поднятого блоках, в целом, схожа. Разрез представлен 3-я литотипами: а) верхняя диатомовая, диатомово-глинистая «шапка», мощностью до 40-50 см, характерная для голоценовых отложений озера, в самой придонной части в некоторых разрезах отмечается миллиметровая Fe-Mn корка, типа «хардграунда»; б) ниже, через постепенный переход, разрез диатомовых илов подстилается гемипелагическими осадками, сложенными неритмично горизонтально-слоистыми, плотными, «маслянистыми» алевро-глинистыми, реже песчано-алевро-глинистыми верхнеплейстоценовыми илами; часто в осадках наблюдаются линзы и прослой гидротроилита, а также частые маломощные (до 7 см) прослой хорошо сортированного тонко-мелкозернистого, мелкозернистого песка и алеврита, и турбидитные циклиты; такое строение интервала осадков связано с увеличением терригенного сноса в верхнеплейстоценовый период; в) в единственной станции TTR-BL22-505G, в самой нижней части колонки (интервал 430-453 см) и в кернорвателе, был обнаружен третий литотип - грязевулканическая брекчия «Байкальского» типа (рис. 1), характеризующаяся наличием комков и окатышей более литифицированных глин [Ахманов и др., 2023].

Все вскрытые разрезы характеризуются наложенными текстурами выхода газа и практически во всех вскрытых разрезах можно наблюдать вертикальные «восстановленные» действующие, реже захороненные, каналы миграции флюида. Наличие каналов миграции флюидов в осадках тесно связано с зонами фокусированной разгрузки углеводородов - чем ближе к очагу, тем более «свежие» каналы миграции [Кудаев и др., 2017].

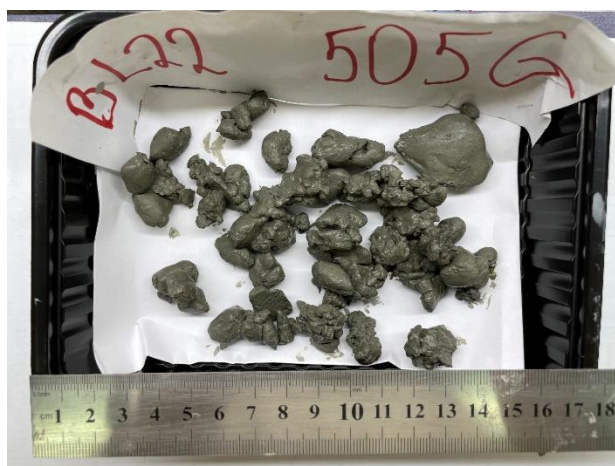


Рис 1. Отмытые комки предположительно фрагментов пород из грязевулканической брекчии, станция TTR-BL22-505G, интервал - 453 см

Геохимическая характеристика

Для исследования флюидоразгрузки в пределах района структуры МГУ был изучен состав газовой фазы донных отложений. В ходе анализа было определено, что значения концентрации метана повышены даже в станциях, отобранных на периферийных участках от структуры «МГУ» и составляют 16 – 19 мл/л. Главная аномалия концентрации метана связана со структурой «МГУ», здесь концентрация метана в осадках достигает 296 мл/л. Также была зафиксирована аномалия на опущенном блоке разлома, к юго-востоку от структуры «МГУ», в которой концентрация метана составляет 212 мл/л [Vidishcheva et al., 2021]. Помимо метана, среди УВ газов были обнаружены следы этана, пропана, изо-бутана, бутана, изо-пентана и пентана. Значения изотопного состава углерода метана составили от -57 до -64‰ VPDB, что свидетельствует о смешанном, микробно-термогенном происхождении газа.

Органическое вещество донных отложений, исследованное методом ГХ-МС, в верхней части разреза характеризуется как незрелое. Однако в интервале 433 см станции TTR-BL22-505G, согласно индексам термической зрелости по стерановым, терпановым и ароматическим углеводородам, было обнаружено преобразованное органическое вещество высокой степени зрелости (Богданов и др., 2022).

Заключение

Геолого-геофизические и геохимические материалы, собранные в экспедициях Class@Baikal, позволяют всесторонне охарактеризовать внутреннее строение и предположить грязевулканическую природу структуры «МГУ».

В дальнейших рейсах Class@Baikal планируется выполнить пробоотбор с неопробованных ранее фронтальных участков поднятого крыла и межвершинных впадин с целью найти грязевой поток предполагаемого вулкана.

Благодарности

Авторы благодарят экипаж и капитана НИС «Г.Ю. Верещагин» за теплую атмосферу в экспедициях Class@Baikal, а также сотрудников Лимнологического института СО РАН за ценные советы и рекомендации.

Список литературы:

1. Ахманов Г. Г., Немченко Н. В., Соловьева М. А., Хлыстов О. М. Литология верхнечетвертичных отложений глубоководных частей впадин озера Байкал (по результатам экспедиций class@baikal 2014-2022 годов) // Экзолит-2023. Новаторская литология Фролова: общее и частное: годичное собрание (научные чтения), посвященные 100-летию со дня рождения Владимира Тихоновича Фролова. Сборник научных материалов. — Москва: ООО МАКС Пресс, 2023. — С. 36–40.
2. Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М., Ефремов В.Н., Видищева О.Н., Маццини А., Кудяев А.А., Буланова И.А., Барымова А.А., Гордеев Е.К., Деленгов М.Т., Егошина Е.Д., Сорокоумова Я.В., Понимаскин П.О. Открытие новой гидратоносной структуры на дне оз.Байкал // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. — 2018. — № 5. — С. 111–116

3. Богданов А. А., Видищева О. Н., Рязанцева К. Ю., Немченко Н. В., Ахманов Г. Г., Соловьева М. А. Результаты исследований углеводородных газов и органического вещества донных отложений грязевого вулкана МГУ в экспедиции class@baikal-2022 // Труды XI Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022 Том IV (IV). — Т. 4. — ООО ПолиПРЕСС Тверь: 2022. — С. 171–174.
4. Кудяев А.А., Корост Д.В., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. Аутигенная минерализация в зонах фокусированной разгрузки углеводородов озера Байкал // Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Москва, 10-14 апреля, 2017 г. – 2017. – С. 478-479
5. Vidishcheva O. N., Akhmanov G. G., Solovyeva M. A., Mazzini A., Khlystov O.M., Egoshina E.D., Kudaev A.A., Korost D.V., Poludetkina E.N., Morozov N.V., Grigorev K.A. Hydrocarbon gas seepage along the gydratny fault (lake baikal) // *Moscow University Geology Bulletin*. — 2021. — Vol. 76, no. 4. — P. 353–365

УДК 550.8.072

Рубрика 38.53.25

ГЕОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕФТЕ-
ГАЗОГЕНЕРАЦИИ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL MODELLING OF THE OIL AND GAS
GENERATION PROCESSES IN THE BAIKAL RIFT ZONE

**Рязанцева Ксения Юрьевна, Большакова Мария Александровна, Ахманов Григорий
Георгиевич, Видищева Олеся Николаевна, Деленгов Михаил Тарасович**

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва

**Ryazantseva Kseniya Yuryevna, Bolshakova Maria Aleksandrovna, Akhmanov Grigorii
Georgievich, Vidishcheva Olesya Nikolaevna, Delengov Mikhail Tarasovich**

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Введение

Байкал – уникальный геологический объект, самый крупный современный внутриконтинентальный пресноводный бассейн, рифт в активной стадии тектонического развития. Несмотря на большой интерес учёных к исследованию этого озера, остаётся много неопределённостей, связанных с возрастом пород и строением осадочного чехла. Слабая геологическая изученность, малое количество глубинных сейсмических исследований, наличие только малоглубинного бурения не позволяют однозначно судить о внутреннем строении рифтовой впадины Байкала. Предположения о его строении базируются на данных изучения кернов небольшого количества скважин, включая наземные, и обнажений на бортах озера.

На Байкале известны поверхностные углеводородные проявления в виде нефтяных плёнок, скоплений газовых гидратов, выходов газа со дна озера (Конторович и др., 2007; Видищева, 2023), что свидетельствует о наличии нефтяной системы. Это подразумевает существование нефте-газоматеринской толщи (НГМТ) в разрезе осадочного выполнения Байкальского рифта. Есть предположение, что НГМТ для байкальских флюидов может служить танхойская угленосная толща миоцен-плиоценового возраста (Хлыстов и др., 2007).

Цель работы: смоделировать процессы генерации и миграции углеводородных флюидов в осадочном выполнении Байкальского рифта.

Задачи:

- построить геологический каркас для бассейновой модели и создать модель его литологического заполнения
- откалибровать модель, опираясь на имеющуюся информацию о термическом режиме бассейна, на данные о местах разгрузки и фазовом составе разгружающихся углеводородных флюидов и на информацию, полученную по молекулярному и изотопному составу разгружающихся углеводородных флюидов, о свойствах исходного для них органического вещества
- проверить чувствительность модели к изменению положения и распространения в разрезе угленосных отложений

- оценить чувствительность масштабов генерации к неопределенностям в мощности и характеристиках высокоуглеродистых отложений осадочного бассейна впадины Байкала.

Результаты

Построена 2D модель, в которой учтены сценарии с различным положением углистых прослоев (Рис. 1). Общая мощность осадочного разреза принята в 5215 метров, мощность угленосной части разреза - 2315 метров. Глубинный разрез получен пересчётом временного сейсмического профиля через центральную котловину (Хатчинсон, 1992), скорость для воды взята 1,425 км/с, для осадочной толщи 2,3 км/с.

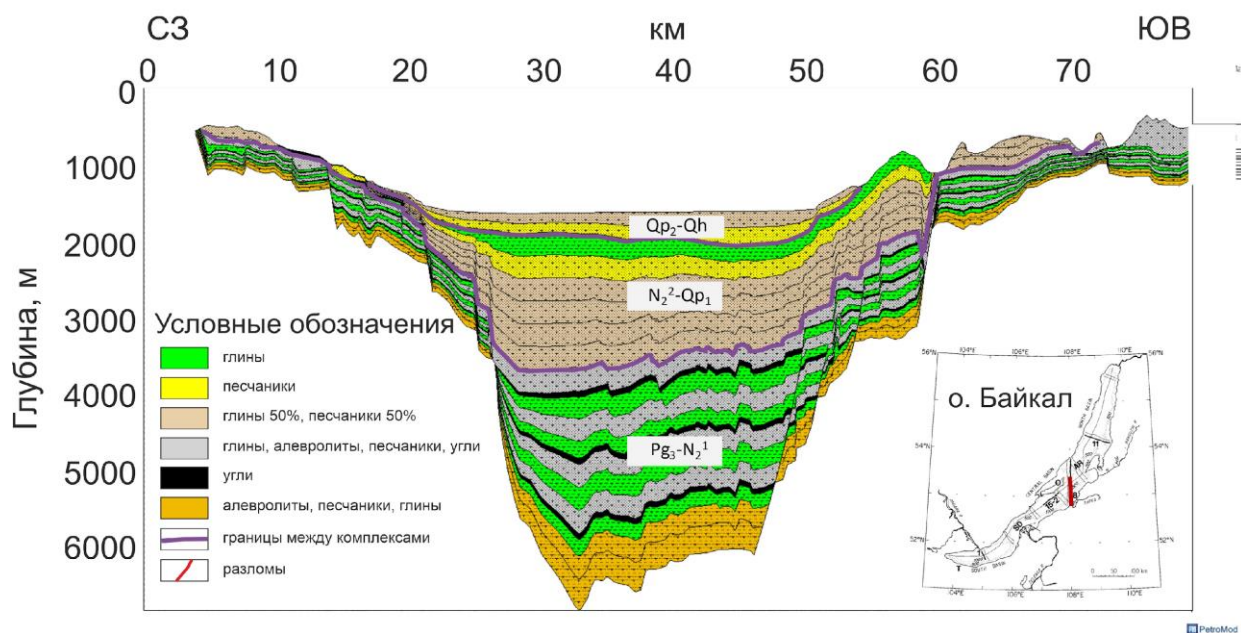


Рис 1. Разрез с тремя положениями угленосных отложений в нижнем палеоген-неогеновом комплексе. Красная линия на карте – линия профиля

Промоделированы сценарии различного распространения углей по площади центральной котловины озера. Проверены две точки зрения: (1) угленосные серии присутствуют по всей ширине бассейна (Рис. 1) и (2) угли фиксируются исключительно в ЮВ части разреза и не распространены на северо-западе (Рис. 2). Предположение о возможном ограниченном распространении углей опирается на представления о том, что ЮВ часть котловин в раннем кайнозое характеризовалась более мелководными и, соответственно, благоприятными обстановками для накопления угленосных отложений по сравнению с СЗ частью, где опускание бассейна шло более активно.

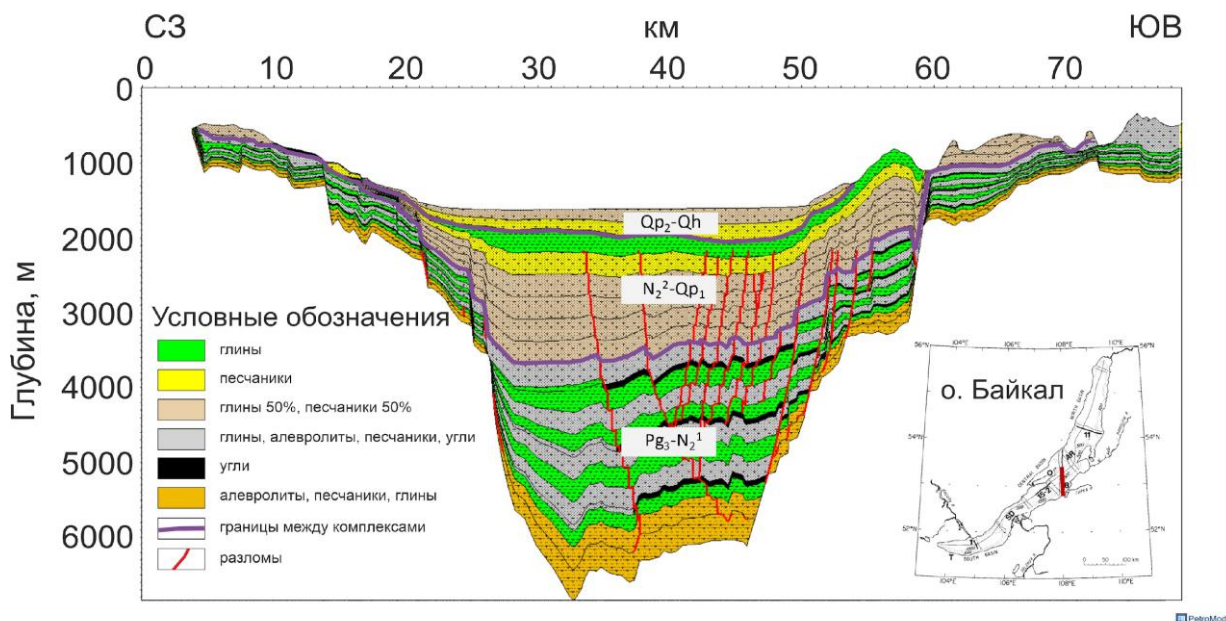


Рис 2. Разрез, где угленосные отложения распространены в ЮВ части профиля

Расчёт катагенетического преобразования предполагаемой НГМТ показал (Рис. 3), что градаций катагенеза до АК1 могли достичь только угли самых низов (глубины 3400-3800 м) моделируемого разреза. О такой степени преобразованности материнской породы говорят результаты исследований газов, отобранных в местах их разгрузки на дне озера в ходе экспедиций Class@Baikal (Видищева, 2023). Биомаркерный же анализ нефтей, отобранных на Байкале, дал результат, свидетельствующий о преобразованности НМТ до градаций МК3-МК4 (Видищева и др., 2021), из чего делаем следующий вывод: угленосные прослои могут находиться как в нижней части палеоген-неогенового комплекса, так и в его средней части (глубины 2700-3200 м).

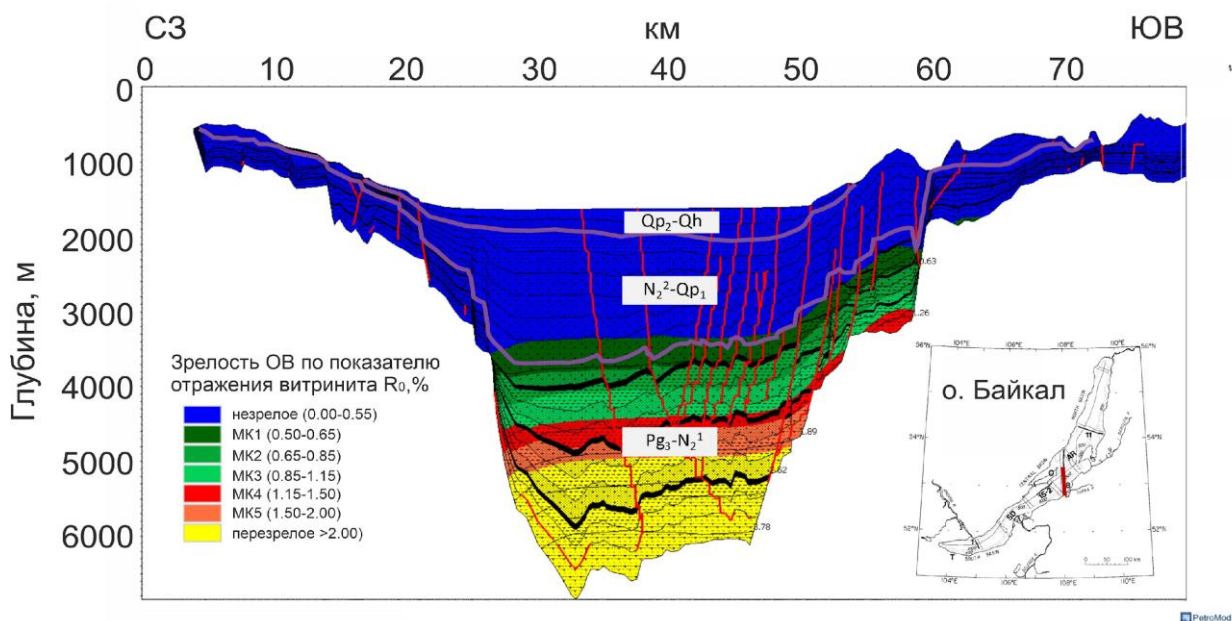


Рис 3. Положение зон нефте- и газогенерации в разрезе осадочного бассейна котловины оз. Байкал

Более правдоподобный сценарий распространения угленосных отложений по простиранию с ЮВ на СЗ выявлен в ходе расчета миграции сгенерированных флюидов (Рис. 4 и 5). Модель показывает, что при максимальном распространении углей от борта до борта котловины миграция должна регистрироваться в виде выходов термогенного газа на всей поверхности дна озера. Такая картина противоречит натурным наблюдениям. Согласно данным О.Н. Видищевой (2023) значимые концентрации термогенных газов обнаруживаются на ЮВ борту, тогда как на СЗ борту преобладает микробный метан, а также миграция нефти наблюдается только в ЮВ части. Если в модель закладывать распространение углей только в ЮВ части бассейна, то миграция газа и нефти «идёт» к поверхности только на юго-востоке, что ближе к наблюдаемой геологической картине.

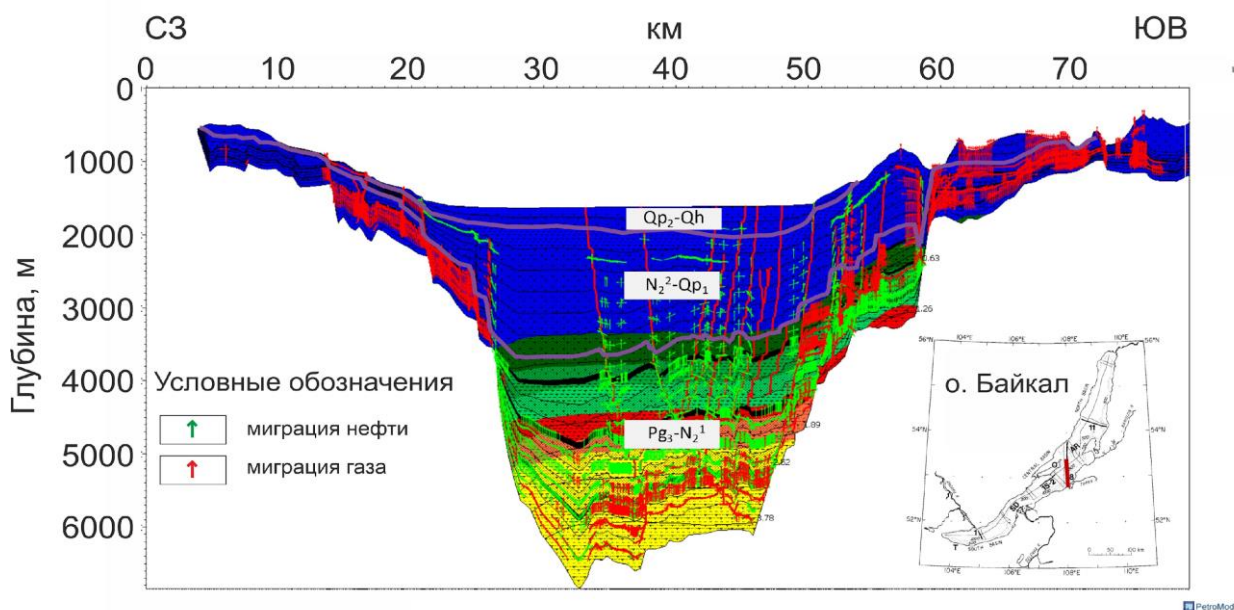


Рис 4. Направление миграции, рассчитанное для сценария с положением угленосной пачки по всей длине профиля в нижней части разреза

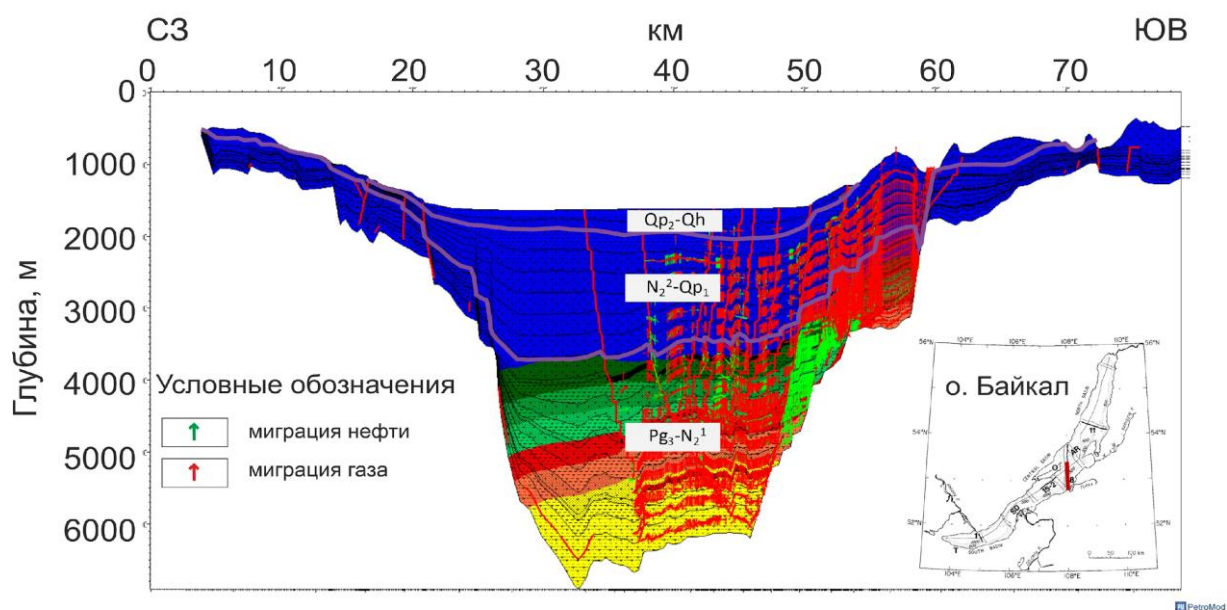


Рис 5. Направление миграции, рассчитанное для сценария с положением угленосной пачки в нижней части разреза в ЮВ части бассейна

Моделирование также показало чувствительность углеводородной системы к вариациям в мощностях угленосных отложений. Для одного сценария мощность углей была задана в 80 метров, исходя из предположения о среднем содержании углей в угленосных толщах в 3,5% (Национальный Атлас России). Второй сценарий напрямую отражал максимальную общую наблюдаемую мощность углей (~8 м) в возможных аналогах изучаемой части разреза (танхойская свита), описанную для обнажений и в скважинах на бортах озера (Мац, 2013, Мащук и др., 2012). В первом случае генерация углеводородов (УВ) составила от 1,241 до 6,582 млн. тонн нефти и от 0,618 до 1,868 млн тонн газа на км² в зависимости от генерационных характеристик угля, во втором случае - от 0,125 до 0,658 млн тонн нефти и от 0,062 до 0,187 млн тонн газа на км². Использовались данные по пиролизу двух образцов угля, отобранных из обнажения Шахтёрская горка. В ходе пиролиза помимо генерационных характеристик углей были получены кинетические спектры разрушения керогена, которые также были интегрированы в модель.

Выводы

Моделирование с расчетом нескольких сценариев продемонстрировало, что результаты, наиболее приближенные к данным натурных наблюдений, показывают модели, где угленосные толщи расположены в нижней или средней части палеоген-неогенового комплекса, причем не по всей площади распространения свиты, а только в ЮВ части.

Масштабы генерации по предварительным оценкам могут составлять от 0,125 до 6,582 млн тонн нефти и от 0,062 до 1,868 млн тонн газа на км² в зависимости от мощности угленосных прослоев и генерационных характеристик угля. Эти значения сопоставимы с масштабами генерации доманиковой ВУФ Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна (Санникова и др., 2017).

Благодарность

Авторы благодарят Калмыкова А.Г., Пронину Н.В., Савостина Г.Г., Иванову Д.А., Мальцева В.В., Макарову Е.Ю., Кожанова Д.Д. за содействие и советы.

Список литературы:

1. Видищева О.Н. Особенности генерации и миграции углеводородных флюидов в рифтовом бассейне озера Байкал. 2023. Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.
2. Конторович А. Э., Каширцев В. А., Москвин В. И. и др. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // Геология и геофизика. 2007. т. 48, № 12. С. 1346—1356
3. Мац В. Д. Стратиграфия отложений позднего мела кайнозоя Байкальского рифта // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2013. – т. 21. – №. 6. – С. 72-72.
4. Мащук И.М., Акулов Н.И. Олигоценные отложения Байкальской рифтовой впадины // Геология и геофизика, 2012, т. 53, № 4. - С. 461 – 475.

5. Национальный Атлас России. – Т. 2. Геологическое строение и ресурсы недр. Угленосные бассейны. [Электронный ресурс] - URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/84-85.html?ysclid=lmtnomnibw14669095> . Дата обращения: 22.09.23
6. Санникова И.А., Большакова М.А., Ступакова А.В., Сауткин Р.С., Сулова А.А., Козлова А.А. Моделирование масштабов генерации углеводородных флюидов доманиковой нефтематеринской толщей Тимано-Печорского бассейна с использованием различных кинетических спектров деструкции органического вещества //Георесурсы. -2017. – Спецвыпуск. –Ч. 1. С. 65-79.
7. Хлыстов О.М., Горшков А.Г., Егоров А.В. и др. Нефть в озере Мирового наследия //Доклады академии наук, 2007, том 414, №5, с. 1 – 4.
8. Hutchinson, D. R., Golmshtok, A. J., Zonenshain, L. P., Moore, T. C., Scholz, C. A., Klitgord, K. D. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data //Geology. – 1992. – Т. 20. – №. 7. – С. 589-592.
9. Vidishcheva O., Delengov M., Fadeeva N., Poludetkina E., Bakay E., Akhmanov G., Mazzini A., Morozov N., Khlystov O. Oil and gas potential source of the Lake Baikal sediments: gas-geochemical and biomarker study. 30th International Meeting on Organic Geochemistry 12-17 September 2021, Montpellier, France.

УДК 550.8.055

Рубрика 38.33.00

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАЙКАЛ

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND DISTRIBUTION OF ORGANIC MATTER IN BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL

Видищева Олеся Николаевна, Богданов Александр Александрович, Рязанцева Ксения Юрьевна, Ахманов Григорий Георгиевич, Абля Энвер Алексеевич, Калмыков Антон Георгиевич

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

Vidishcheva Olesya Nikolaevna, Bogdanov Aleksandr Aleksandrovich, Ryazantseva Ksenia Yurievna, Akhmanov Grigorii Georgievich, Ablya Enver Alekseevich, Kalmykov Anton Georgievich

Lomonosov Moscow State University, Moscow

Введение

Озеро Байкал представляет собой рифтовую впадину в центре Азиатского континента. Уникальной характеристикой озера являются многочисленный выходы газа со дна, с которыми часто ассоциированы скопления газовых гидратов (Калмычков и др., 2006; Khlystov et al., 2018). Вдоль восточного побережья озера также известны просачивания нефти (Конторович и др., 2007). Все выше перечисленное свидетельствует об активной нефтяной системе осадочного бассейна озера Байкал.

С 2014 года в рамках проекта Class@Baikal проводятся геохимические исследования донных отложений озера. Основа метода - выявление в верхней части донных отложений углеводородных (УВ) соединений, мигрировавших из зон скопления нефти и газа. Изучение миграционной компоненты позволяет получить информацию о нефтегазогенерирующей толще, что очень ценно для изучения нефтяных систем. Предыдущие исследования были сосредоточены на газовой составляющей донных отложений (Видищева и др., 2021; Видищева и др., 2022). В настоящей работе представлены результаты исследования органического вещества (ОВ) донных отложений. ОВ имеет сложный состав, вследствие чего предоставляет большой набор информации о нефтегазоматеринской толще (НГМТ). Основная цель исследования - подтвердить информацию о НГМТ, полученной на основании изучения газов, а также дополнить ее новыми данными.

Материалы и методы исследования

Фактический материал, используемый в исследовании, был получен во время экспедиции Class@Baikal-2022. В работе представлены образцы из 9 станций в пределах южной и центральной котловины озера Байкал. В каждой станции был исследован состав газовой фазы и ОВ. Газ из осадков отбирался согласно стандартной методике "HeadSpace" (Большаков, Егоров, 1987). Исследования молекулярного состава газа и определение концентрации компонентов выполнялись на газовом хроматографе «Хроматэк - Кристалл 5000» (ЗАО СКБ

“Хроматэк”, Йошкар-Ола). Изотопный состав углерода метана и этана проводился на изотопном масс-спектрометре «Thermo Fisher Scientific Delta V Plus» с хромато-масс-спектрометрической приставкой «ISQ-TRACE 1310».

ОВ из донных отложений извлекалось с помощью горячей экстракции хлороформом в аппарате Сокслета. Порошок активированной меди использовался для отделения серы от экстракта. Из полученного экстракта с помощью гексана (40:1 по объему) в течение суток выделяли асфальтены. Полученные мальтены разделяли методом колоночной жидкостно-адсорбционной хроматографии на активированном силикагеле. Неполярную насыщенную фракцию элюировали гексаном, ароматическую фракцию - толуолом, а полярную фракцию десорбировали этанолом:толуолом в соотношении 1:1 (об.). Анализ молекулярного состава фракций УВ определялся методом хромато-масс-спектрометрии (ХМС) на газовом хроматографе Agilent 8890, соединенном с масс-селективным детектором 5977В с высокоэффективным источником ионизации Inert plus.

Результаты

Молекулярный и изотопный анализ газа донных отложений показал, что в изучаемых станциях присутствует газ трех типов: микробный, термогенный и смешанный. Оценка вклада микробного газа в результирующую смесь, сделанная по значениям изотопного состава углерода метана (Видищева, 2023), показала, что вклад микробного газа для изученных проб изменяется от 3 до 78%.

Исследование параметров зрелости углеводородов биомаркеров ($T_s/(T_s+T_m)$, $22S/(22S+22R)C_{31}$, $H_{29}T_s/H_{29}$, $\beta\beta/(\alpha\alpha+\beta\beta)C_{29}$, $\alpha\alpha_{20S}/(S+R)C_{29}$) позволило определить наличие миграционной компоненты в составе ОВ донных отложений. В результате было выделено как "зрелое", так и "незрелое" ОВ. При этом "зрелое" ОВ мигрировало из зоны мезокатагенеза ($T_s/(T_s+T_m)=0,71$). Ввиду большого количества сингенетичного ОВ в донных отложениях, для оценки вклада миграционной составляющей было определено процентное содержание соединений, отражающих цепочку превращения ОВ: голены – биогопаны ($\beta\beta$) – моретаны ($\beta\alpha$) – геогопаны ($\alpha\beta$). Повышенные концентрации биологических гопанов и голенов в ОВ анализируемых осадков свидетельствует о его низкой степени зрелости.

Учитывая долю вклада микробного газа в общую газовую смесь и вклада миграционной компоненты в сингенетичное ОВ донных отложений были выделены 3 группы образцов. Первая группа характеризуется высоким содержанием миграционных УВ. К ней относятся станции, отобранные на восточном борту Байкальской впадины (БВ). В структурно-тектоническом отношении БВ представляет собой ассиметричную впадину с крутым северо-западным и пологим юго-восточным бортом. При этом юго-восточная часть характеризуется меньшей мощностью осадочных отложений и большим количеством разломов, что благоприятно сказывается на миграции УВ флюидов. С этим может быть связано присутствие в донных отложениях большой доли миграционных УВ как жидких, так и газообразных.

Вторая группа характеризуется высоким вкладом микробного газа и высокой долей миграционного битумоида. Образцы с такими характеристиками были отобраны из станций, приуроченных к дельте р. Селенга. Река Селенга является основным поставщиком осадочного материала в Байкал, образуя очень мощные дельтовые отложения. Высокий вклад микробного газа может быть объяснен разложением большого количества современного ОВ, приносимого рекой. Присутствие миграционного битумоида может быть связано с нефтяной системой дельтовых отложений, с которыми часто ассоциированы месторождения нефти и газа.

Третья группа характеризуется высоким вкладом микробного газа и современного ОВ. Для двух станций, что находятся в центральной и северо-западной части БВ, это может быть

объяснено мощной толщей отложений, меньшим количеством разломов, в следствии чего происходит рассеивание ОВ. В данную группу также попали образцы из 2 станций, приуроченных к юго-восточной части дельты р. Селенга. На настоящий момент не найдено объяснения, почему эти образцы не попали во вторую группу, которая относится к дельтовой системе. Это потребует привлечения сейсмоакустических данных и анализа тектоники района исследования.

Также для изученных образцов был проведен анализ типа исходного ОВ. Оценка была проведена для группы образцов с низким вкладом современного ОВ. Среди таких отложений выделяется два разных типа исходного ОВ, характеризующие НГМТ различного состава: 1) НГМТ глинистого состава (t24/t23, T24/t26, T24/H30, H29/H30), формировавшаяся в озерных обстановках (t24/t26, H31R/H30) и имеющая в составе ОВ высокую долю остатков высшей растительности (C27:C28:C29) и 2) НГМТ глинистого состава, морских обстановок осадконакопления с преобладающей долей бактериального и водорослевого ОВ.

Выводы

Исследования ОВ и газовой составляющей донных отложений озера Байкал позволили выделить районы с разным вкладом миграционных УВ. Различия в соотношении незрелого и миграционной компоненты были объяснены особенностями процессов миграции и геологического строения Байкальской впадины. Проведенный анализ типа исходного ОВ показал присутствие разной по составу НГМТ.

Список литературы:

1. Большаков А. М., Егоров, А. В. (1987). Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. – 1987. – 27 № 5. – С. 861-862.
2. Видищева, О. Н., Ахманов, Г. Г., Соловьева, М. А., Маццини, А., Хлыстов, О. М., Егошина, Е. Д., ... & Григорьев, К. А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал) // *Вестник Московского университета. Серия 4: Геология*. – 2021. – №. 3. – С. 3-16.
3. Видищева, О. Н., Ахманов, Г. Г., Кислицына, Е. В., Маццини, А., Мальцева, А. Ю., Полудеткина, Е. Н., ... & Хлыстов, О. М. Различия в молекулярном и изотопном составе газов зон фокусированной разгрузки, расположенных в северо-западной и юго-восточной частях озера Байкал // *Георесурсы*. – 2022. – Т. 24. – №. 2. – С. 209-216.
4. Видищева О.Н. Особенности генерации и миграции углеводородных флюидов в рифтовом бассейне озера Байкал. 2023 Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук.
5. Калмычков Г. В., Егоров А. В., Кузьмин М. И., Хлыстов О. М. Генетические типы метана озера Байкал // *Доклады академии наук*. – 2006. – 411(5). – С. 672-675.
6. Конторович А. Э., Каширцев В. А., Москвин В. И. и др. Нефтегазоносность отложений озера Байкал // *Геология и геофизика*. – 2007. – 48(12). – С. 1346-1357.
7. Khlystov, O. M., Khabuev, A. V., Minami, H., Nachikubo, A., & Krylov, A. A. Gas hydrates in Lake Baikal // *Limnology and Freshwater Biology*. – 2018. – 1. – P. 66-70.

8. Медведева А.Ю., Архипкин В.С., Мысленков С.А., Зилитинкевич С.С. Волновой климат Балтийского моря на основе результатов, полученных с помощью спектральной модели SWAN // Вестник МГУ. Серия 5: География. – 2015. – № 1. – С. 12–22.
9. Booij N., Ris R.C., Holthuijsen L.H. A third-generation wave model for coastal regions. Part 1. Model description and validation // J. Geoph. Res. – 1999. – Vol. 140, No. C4. – P. 7649–7666.

УДК 550.834.05

Рубрика 38.57.23

**РОЛЬ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГАЗОВЫХ ГИДРАТОВ
НА ОЗЕРЕ БАЙКАЛ**

**THE ROLE OF TECTONIC PROCESSES IN THE GENERATION OF GAS HYDRATES ON
THE BAIKAL LAKE**

**Соловьева Марина Андреевна¹, Видишева Олеся Николаевна¹, Ахманов Григорий
Георгиевич¹, Маццини Адриано², Хлыстов Олег Михайлович³**

¹ МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва

² Университет Осло, Норвегия

³ ЛИИ СО РАН, Иркутск

**Solovyeva Marina Andreevna¹, Vidishcheva Olesya Nikolaevna¹, Akhmanov Grigorii
Georgievich¹, Mazzini Adriano², Khlystov Oleg Mikhailovich³**

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² University of Oslo, Norway

³ LIN SB RAS, Irkutsk

Введение

Озеро Байкал является уникальным природным объектом. Здесь, на относительно небольшой площади, проявлен широкий спектр геологических процессов, которые оказывают сложное влияние друг на друга и формируют уникальные черты озера. Чтобы разобраться в этих хитросплетениях и изучить особенности геологических процессов на озере Байкал, в 2014 году был организован проект Class@Baikal, в рамках которого к настоящему времени выполнено 7 международных геолого-геофизических экспедиций. Собранные в рейсах, колоссальная база геологических, геохимических и сейсмоакустических данных уже сейчас сопоставима по объёму со всеми ранее выполненными исследованиями. Масштаб работ, планомерность и детальность исследований, а также комплексный взгляд при изучении геологических процессов воплотились в удивительные открытия, позволившие подойти к решению фундаментальных задач геологии. В том числе, немаловажную роль в проекте Class@Baikal играет изучение газовых гидратов и тектонических процессов, а также их возможной взаимосвязи, что и лежит в основе данной работы.

Методика исследований

Экспедиции проекта Class@Baikal включают комплекс геофизических, геологических, геохимических и гидрогеологических методов, основными из которых для данной работы являются разночастотные сейсмоакустические исследования и геохимический анализ поровых флюидов в осадке.

Геофизические исследования велись на трёх частотах с использованием пневмоисточника (150 Гц), электроискрового источника "спаркер" (450-750 Гц) и профилографа (1-6 кГц). Съёмка в трёх диапазонах частот позволила оптимально решать поставленные задачи и получать информацию как о придонных осадках с высокой степенью детальности, так и о глубинном (до 800 м) интервале разреза.

Отбор донных осадков осуществлялся ударными трубками длиной от 3 до 5 м. Из извлечённого керна отбирались пробы для исследования молекулярного состава газовой фазы порового флюида на газовом хроматографе и определения изотопного состава углерода на масс-спектрометре.

Изучение тектонического строения

Озеро Байкал расположено в центральной части активной рифтовой зоны на сочленении Восточно-Сибирской платформы и Саяно-Байкальского подвижного пояса, в связи с чем на его акватории широко развиты тектонические процессы [Леви и др., 1995]. История их изучения насчитывает уже более 60 лет, за это время были составлены многочисленные схемы разломов, проявленных в пределах озера и на прилегающих территориях. В основе тектонических схем лежат структурно-геологические исследования, информация об эпицентрах землетрясений и данные немногочисленных глубинных сейсмических съёмок. Скромный объём геофизических данных высокого качества привёл к неоднозначности интерпретации и существенным различиям в тектонических схемах разных авторов [см. например, Levi et al., 1997; Семинский, 2001; Логачев, 2003; Лухнев и др., 2013; Лунина, 2016; и др.].

Материалы экспедиций Class@Baikal, собранные в 2014-2019 годах, позволили существенно уточнить тектоническое строение в юго-западной части центральной котловины озера [Solovyeva et al., 2020]. Новые глубинные данные 2022 года увеличили площадь исследуемого участка, полностью охватив центральную котловину озера Байкал. В этой зоне были выделены серии цветковых разломов, которые характерны для трансензионных обстановок. Отдельные крупные разломы и ненарушенные разрывными нарушениями участки озера формируют блоковую структуру. Выделяются относительно стабильные участки и разломные зоны.

Изучение газовых гидратов

Байкал – единственное в мире пресноводное озеро, в котором были найдены газовые гидраты. Их формирование возможно благодаря большой глубине озера и высокому содержанию метана в осадках. Наличие газовых гидратов на Байкале было предсказано более 40 лет назад [Ефремова и др., 1980], а в начале 1990-х годов, в ходе первых глубинных сейсморазведочных работ получено косвенное подтверждение гипотезы – обнаружена граница BSR (bottom simulated reflector) [Hutchinson et al., 1991]. Позднее существование гидратов было доказано при глубоководном бурении в 1997 году [Кузьмин, 1998]. Их наличие в приповерхностных отложениях также подтверждено при донном пробоотборе в 61 структуре на дне озера [Khlystov et al., 2022].

Для оценки площади возможного распространения газовых гидратов в 1997 году была закартирована граница BSR, которая часто маркирует подошву интервала осадков, содержащих газовые гидраты [Гольмшток и др., 1997]. На протяжении 20 лет схема не претерпевала существенных изменений, поскольку не выполнялись геофизические работы достаточной глубинности. Неоценимый вклад в развитие этой научной темы внёс проект Class@Baikal, результаты сейсморазведочных работ которого позволили создать новую карту

распространения границы BSR, существенно уточнившую и расширившую существовавшие до этого схемы [Соловьева и др., 2022].

В результате детального изучения характеристик границы BSR установлено, что она по-разному проявляется в волновом поле и в некоторых случаях отличается от "классических" представлений. Параллельность дну, заложенная в определении понятия "BSR", иногда нарушается – граница ступенчато поднимается, свидетельствуя о резких изменениях в значениях теплового потока. Также, разнообразие поверхности BSR отмечено не только в морфологии, но и в характере её проявления в волновом поле – на некоторых участках отчётливо прослеживаемая тонкая граница (шириной в 1-3 фазы) начинает преобразовываться в многоуровневые высокоамплитудные аномалии, состоящие из серии коротких рефлекторов. Все такие участки нетипичного поведения границы BSR были отмечены и закартированы.

Связь тектонических процессов и гидратообразования

Особенности распространения газовых гидратов и их проявление в волновом поле анализировались с различных точек зрения, в том числе, с учетом их возможной связи с тектоническими процессами. Установлено, что участки "неклассического" проявления границы BSR (резкие поднятия, не связанные с изменением рельефа дна, и многофазность) в большинстве случаев приурочены к тектоническим нарушениям. Данный факт позволяет предполагать современную разгрузку флюидов по этим разломам с увеличением теплового потока. Несмотря на это, в других зонах граница BSR не реагирует на наличие разломов, в том числе, выраженных в рельефе дна, что может свидетельствовать о низкой активности флюидоразгрузки в этих местах и/или слабом изменении теплового потока вдоль них.

В работе также анализировалось положение придонных газовых гидратов, которые были обнаружены в 61 структуре на дне. Все они приурочены к крупным, современно активным тектоническим разломам, что говорит о ключевой роли тектонических нарушений в миграции флюидов к поверхности дна для образования придонных скоплений газовых гидратов.

Эти гипотезы также находят своё отражение в данных геохимического опробования, выполненного в ходе экспедиций программы, а также в ходе других рейсов.

Заключение

В рамках данного исследования выполнена амбициозная работа по обобщению всех имеющихся геофизических материалов на озере Байкал с построением новой карты зоны распространения границы BSR и тектонической схемы центральной котловины озера. Установлено, что существуют закономерности между характером гидратообразования и тектоническими процессами. В частности, в формировании газовых гидратов в придонном интервале разреза ключевую роль играет поток флюидов по современно активным разрывным нарушениям. Глубинные газовые гидраты, существование которых предполагается по наличию границы BSR, в меньшей степени контролируются тектоническими разломами.

Благодарность

Авторы выражают признательность всему коллективу Проекта Class@Baikal, чьими руками многие годы собирались и обрабатывались материалы для данного исследования, а также

капитану И.Ю. Бархокову и экипажу НИС «Г.Ю. Верещагин» за их высочайший профессионализм и неоценимую помощь во время экспедиционных работ. Сейсморазведочные работы, позволившие завершить данное исследование, выполнены при финансовой поддержке международного проекта HOTMUD.

Список литературы:

1. Видищева О.Н., Ахманов Г.Г., Соловьева М.А., Маццини А., Хлыстов О.М., Егошина Е.Д., Кудаев А.А., Корост Д.В., Полудеткина Е.Н., Морозов Н.В., Григорьев К.А. Особенности разгрузки углеводородных газов вдоль разлома Гидратный (озеро Байкал) // Вестник МГУ. Серия 4: Геология. – 2021. – № 3. – С. 3–16.
2. Гольмшток А.Я., Дучков А.Д., Хатчинсон Д.Р., Ханукаев С.Б., Ельников А.И. Оценки теплового потока на озере Байкал по сейсмическим данным о нижней границе слоя газогидратов // Геология и геофизика. – 1997. Т.38. – №10. –С. 1677–1691.
3. Ефремова А.Г., Андреева М.В., Левшенко Т.В. и др. О газах в осадках Байкала // Газовая промышленность. Сер. Геология и разведка газовых и газоконденсатных месторождений. 1980. – № 2. – С. 15–27.
4. Кузьмин М.И., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф. и др. Первое обнаружение газогидратов в осадках озера Байкал // Докл. РАН. 1998. – Т. 362. – № 4. – С. 541–543.
5. Леви К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С. Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика. – 1995. – № 36. – С. 143–154.
6. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44. – № 5. – С. 391–406.
7. Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика. – 2016. – Т. 7. – № 3. – С. 407–43.
8. Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Саньков А.В., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Кале Э. Современные деформации земной коры в области сочленения сегментов рифтов центральной части Байкальской рифтовой системы по данным GPS геодезии // Геология и геофизика. – 2013. – № 11. – С. 1814–1825.
9. Семинский К.Ж., Карабанов Е.Б., Кузьмин М.И. Тектонические нарушения осадков озера Байкал // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 1-2. – С.308–318.
10. Соловьева М.А., Ахманов Г.Г., Хлыстов О.М. Новые данные о гидратоносности озера Байкал по результатам глубинных геофизических исследований рейса Class@Baikal-2022 // Труды XI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022". – 2022. – Т. IV. – С. 45–48.
11. Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Scholz C.A., Moore T.C., Lee M.W., Kuzmin M. Bottom simulating reflector in Lake Baikal // EOS. – 1991. – V. 72. – P. 307.
12. Khlystov O.M., De Batist M., Minami H., Hachikubo A., Khabuev A.V., Kazakov A.V. The Position of Gas Hydrates in the Sedimentary Strata // World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins – 2022. – P. 465–471.

13. Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San`kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Gelvaux D. Active faults of the Baikal depression. Bulletin du Centre // Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production. – 1997. – V. 21. – P. 399–434.
14. Solovyeva M.A., Akhmanov G.G., Mazzini A., Khabuev A.V., Khlystov O.M. The Gydratny Fault zone of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. – 2020. – V. 1. – P. 368–373.

УДК 551.35

Рубрика 38.21.31

МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ В ЭКСПЕДИЦИИ «СЕВЕРНЫЙ ПОЛЮС-41»

MARINE GEOLOGY IN THE IN THE EXPEDITION 'NORTH POLE-41'

Попова Елена Александровна, Богин Виктор Артёмович, Малышев Сергей Андреевич, Ованесян Георгий Иванович

Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И. С. Грамберга» (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), Санкт-Петербург

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (ФГБУ «АНИИ»), г. Санкт-Петербург

Popova Elena Aleksandrovna, Bogin Viktor Artemovich, Malyshev Sergey Andreevich, Ovanesyan Georgy Ivanovich

Gramberg All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIO), St. Petersburg

Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), St. Petersburg

Введение и район исследований

Центральная часть Северного Ледовитого океана отличается наличием многолетнего морского льда, что делает этот район менее доступным, но более привлекательным для исследований, в том числе геологических. Новое судно ЛСП «Северный Полюс», созданное для дрейфа во льдах, позволило отобрать материал с основных крупных структур центральной Арктики в рамках экспедиции «Северный полюс – 41», проводимой ФГБУ «АНИИ». Работы проводились на хребте Ломоносова (83-88° с.ш.), в котловине Амундсена, хребте Гаккеля и котловине Нансена (рис. 1).

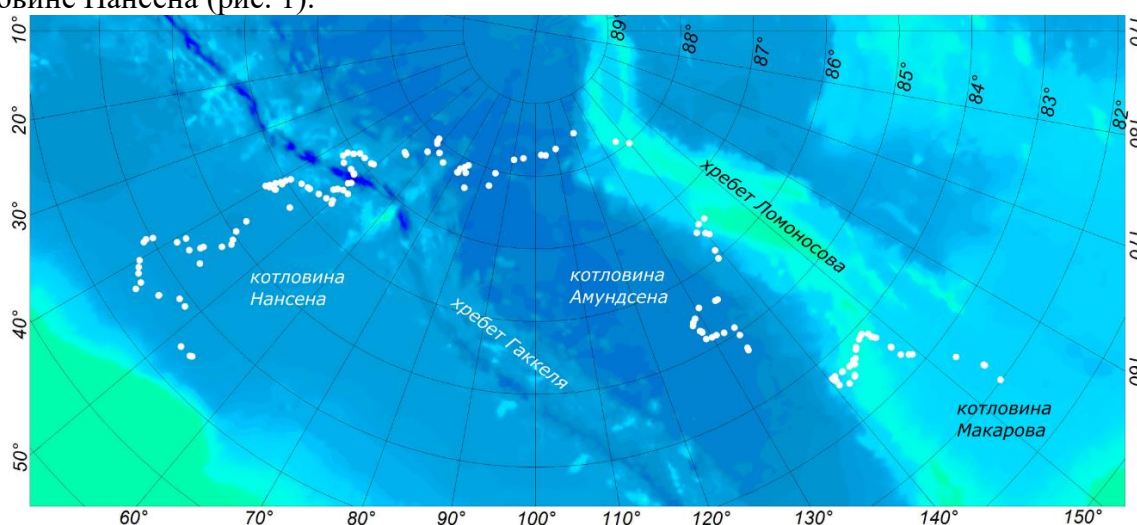


Рис. 1. Схема расположения геологических станций на 28 августа 2023 года

Материал и методы

Донные осадки отбирались при помощи шестиметровой гравитационной трубки и бокс-корера - к концу августа 2023 года выполнено 135 станций донного опробования. На борту изучался предварительный вещественный состав в различных фракциях. Для изучения состава тонкой фракции в отдельных длинных колонках отбирались смерслайды, равномерно по колонке с учётом литологического строения либо в слоях, представляющих особый интерес. Содержание компонентов оценивалось визуально в процентах при помощи поляризационного микроскопа ЛОМО ПОЛАМ Л-213М с увеличениями 10х, 25х, 40х с использованием трафаретов [Mazzullo and Graham, 1988]. Для изучения вещественного состава грубой фракции на борту из некоторых колонок отбирались пробы большого объёма. Осадок просеивался во влажном состоянии сквозь сито с диаметром ячеек 63 мкм, после чего высушивался при комнатной температуре и изучался при помощи бинокля ЛОМО МСП-2 В.2СД на светлой поверхности. Были также определены размер, степень окатанности и состав псефитов (≥ 10 мм). На борту отбирались образцы для различных видов последующего лабораторного анализа на суше (гранулометрический, минералогический, магнито-стратиграфический и другие). Некоторые аспекты геохимии осадков изучались на борту (например, состав поровых газов). Геологическое драгирование не принесло результатов, однако созданная на борту биологическая драга часто использовалась: добывались как пробы бентоса, так и обломки горных пород.

Результаты и обсуждение

Материал сложен алевропелитом с песчанистыми слоями на хребте Ломоносова и пелитом и алевропелитом с вязкими алевритовыми прослоями в котловине Амундсена; ближе к хребту Гаккеля встречены до трёх примечательных розоватых слоёв.

Все компоненты, встреченные в смерслайдах из материала с хр. Ломоносова, можно поделить на три группы: терригенные, биогенные и аутигенные. Первая, доминирующая, группа представлена следующими компонентами: кварц, полевые шпаты (калиевый полевой шпат и плагиоклазы), слюды, терригенный карбонат, пироксены, амфиболы, непрозрачные минералы, зёрна с примесями, неопределённые минералы «зелёное1» и «прозрачные палочки», апатит, титанит, минералы группы эпидота-цоизита, циркон, другие плотные минералы, «непрозрачные минералы со светящимся краем» и вулканические частицы. К группе биогенных, второй по содержанию, относятся карбонатные обломки (обломки крупных фораминифер), фораминиферы (вместе с кокколитофоридами), органическое вещество и спикулы. Наконец, к наименее активно представленной группе аутигенных компонентов отнесены оксиды железа, глауконит и пирит.

На рис. 2 приводится сравнение средних по колонке содержаний компонентов для колонок 23Т, представляющей хр. Ломоносова и 25Т, типичной для котловины Амундсена (36 слайдов в первой и 25 во второй). В то время как содержание таких компонентов как кварц, слюды, зёрна с примесями практически не отличается, разница между некоторыми значительна. В первую очередь, осадки хребта оказались более насыщенными карбонатными остатками организмов: крупных фораминифер и мелких кокколитофорид. Интересно, что содержание аутигенных компонентов в смерслайдах, отобранных на хребте, примерно в два раза выше, чем в котловине Амундсена, в то время как в составе грубой фракции ситуация противоположна. Наконец, осадки с хр. Ломоносова отличаются несколько более высоким содержанием полевых шпатов. Материал из котловины Амундсена в свою очередь отмечен более высоким содержанием непрозрачных частиц (среди которых могут быть как и терригенные тяжёлые минералы, так и аутигенные компоненты) и терригенного карбоната, содержание органического вещества здесь также немного выше.

Изучение смерслайдов даёт также предварительную информацию о гранулометрическом составе осадков. Даже сравнение средних по колонке процентов содержания пелита, алевроита и песка позволяет отметить основные тренды. В осадках хр. Ломоносова содержание наиболее грубозернистых частиц выше, чем в котловине Амундсена, при этом при движении на север (от 83 к 88° с.ш.) содержание песка увеличивается. В котловине Амундсена же заметно увеличение процента алевроита без роста содержания песка – возможно, по причине сортировки частиц в активной гидродинамической обстановке, когда наиболее тонкозернистый материал уносится потоком воды ('winnowing').

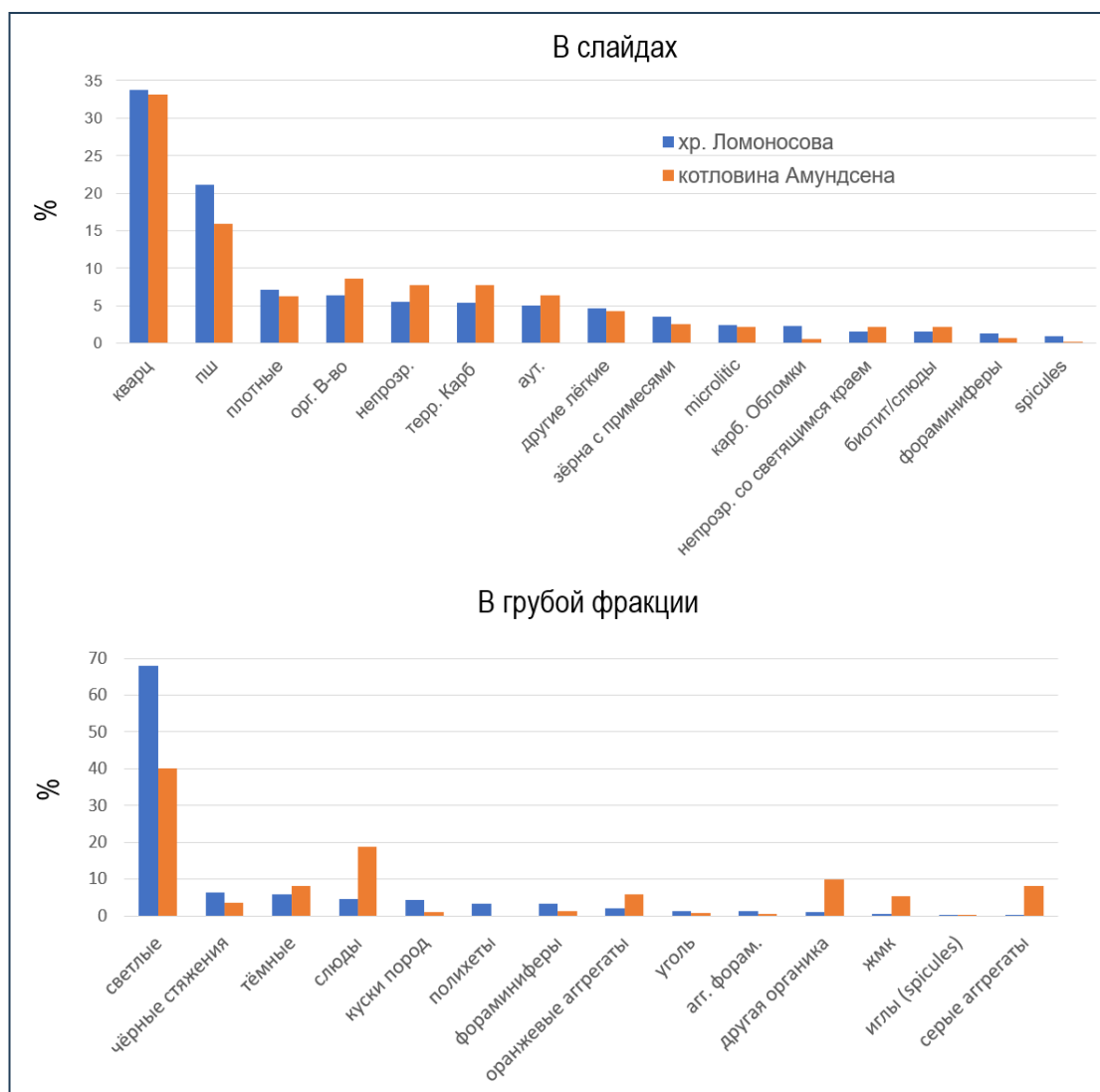


Рис. 2. Сравнение средних по колонке содержаний различных компонентов в смерслайдах (вверху) и грубой фракции ≥ 63 мкм (внизу)

В грубой фракции материала с хр. Ломоносова преобладают светлые минералы (кварц, полевые шпаты), также материал сложен тёмными минералами, слюдами, обломками пород, углём (более активно представленным в северном районе), оранжевыми агрегатами, аутигенными образованиями - чёрными стяжениями, железо-марганцевыми корками и конкрециями (ЖМК), а также биогенными компонентами – фораминиферами в карбонатном и агглютинированном виде и другими менее активно представленными органическими частицами типа игл морских ежей и раковин двустворчатых моллюсков (рис. 2). Колонки из котловины Амундсена по

большей части состоят из тех же компонентов, однако содержания сильно разнятся, а амплитуда колебаний вдоль колонки здесь часто выше. Так, наиболее заметно увеличение содержания железомарганцевых корок, содержание слюд также выросло на порядок и достигает здесь 60-80% в отдельных слоях. Интересно также обилие растительных остатков, не замеченных в осадках с хребта.

В некоторых колонках, отобранных на хр. Ломоносова и поблизости, были замечены явные пики угля в грубой фракции (рис. 3), благодаря которым можно точнее скоррелировать колонки между собой и отметить уменьшение мощности слоёв при движении к северу, вызванное либо снижением скорости осадконакопления, либо размывом осадков мощными течениями. В трёх колонках из северной части хребта в одном и том же слое серого алевропелита найдены куски обгоревшего дерева, частично замещённого пиритом (?). Некоторые авторы убеждены, что значительные пики содержания угля в осадках Арктики присущи шестой морской изотопной стадии [Bischof et al., 1990].

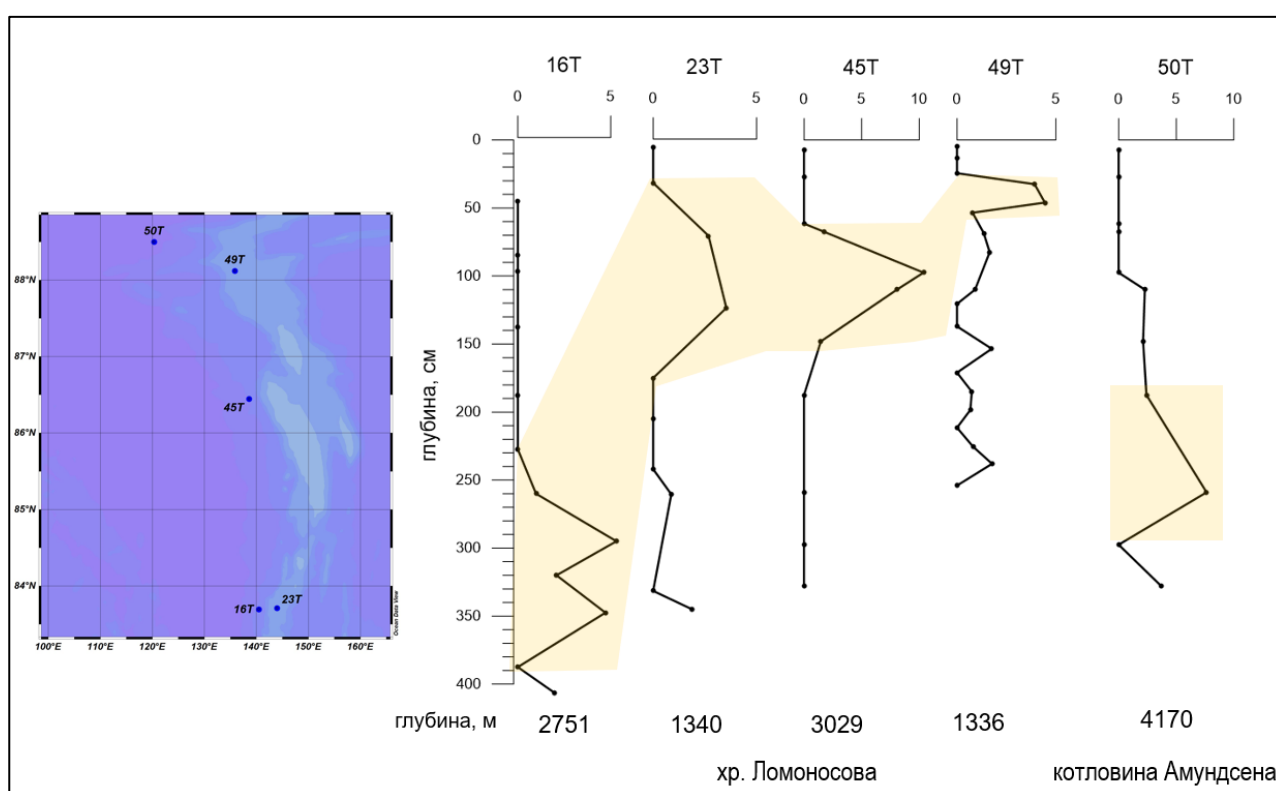


Рис. 3. Распределение угля в грубой фракции осадка вдоль колонок

Данные профиля дна пишутся непрерывно за редким исключением с 4 октября 2022 г. За время дрейфа отмечены и описаны разнообразные структуры как в котловинах, так и на хребте. Например, в котловине Амундсена, помимо плоских параллельных рефлекторов, означающих гемипелагический режим осадконакопления, встретились сигмоидальные структуры, соответствующие контуритам или турбидитам. На склонах хребта отмечены многочисленные свидетельства склоновых процессов в виде хаотичных линз - оползневых тел, несогласий, холмиков - «hummocks»; на плоской вершине хребта, помимо мощных слоёв ровных гемипелагических осадков, в районе 86° с.ш. на протяжении как минимум 30 км встречались эрозийные структуры с толстым хаотичным слоем (диамиктоном), покрытым тонким слоем современных осадков.

Благодарность

Авторы благодарят капитана и команду ЛСП «Северный Полюс», а также учёных на борту за помощь в геологических работах.

Список литературы:

1. Bischof, J., Koch, J., Kubisch, M., Spielhagen, R.F., & Thiede, J. Nordic seas surface ice drift reconstructions: Evidence from ice-rafted coal fragments during oxygen isotope stage 6 // In: J. A. Dowdeswell & J. D. Scourse (Eds), *Glacimarine Environments: Processes and Sediments*. Geological Society of Special Publication. – 1990. – Vol. 53, P. 235–251
2. Mazzullo, J., and Graham, A.G. (Eds.). *Handbook for shipboard sedimentologists*. ODP Tech. Note. – 1988. – № 8. doi:10.2973/odp.tn.8.1988

УДК: 551.35 (262.5); 551.79

Рубрика 38.47.19

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КРЫМСКО-КАВКАЗСКОГО ШЕЛЬФА ЧЕРНОГО МОРЯ В ПЛЕЙСТОЦЕНЕ - ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ

STRUCTURE AND EVOLUTION OF THE CRIMEAN-CAUCASIAN SHELF OF THE BLACK SEA IN THE PLEISTOCENE - HOLOCENE ACCORDING TO SEISMOACOUSTIC PROFILING DATA

Есин Николай Игоревич¹, Пронин Андрей Ардалионович², Хортон Алексей Владимирович²

¹ Южное отделение ИО РАН им П.П. Ширшова, Геленджик,

² ИО им П.П. Ширшова РАН, Москва

Esin Nikolay Igorevich², Pronin Andrey Ardalionovich¹, Khortov Alexey Vladimirovich¹

¹ IO named after P.P. Shirshov RAS, Moscow

² Southern Branch of the IO RAS named after P.P. Shirshov, Gelendzhik,

Введение

В результате сейсмоакустических исследований шельфа юго-восточной части Крыма и северо-западной части кавказского шельфа, от мыса Ай Тодор до Геленджикской бухты, выполненные в 2019-2023 годах сотрудниками Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН, с использованием сейсмоакустического и акустического профилографов, стало возможным значительно уточнить строение верхней части осадочного разреза на глубину до 300 м. В результате сейсмостратиграфического анализа здесь выделена серия сейсмических комплексов неоген- голоценового возраста. Сейсмофациальный анализ волнового поля позволил уточнить положение и палеогеографические условия формирования палеодолин.

На основе полученных сейсмических профилей и данных по сопредельной суше был рассмотрен процесс формирования крымско-кавказского шельфа Черного моря. Его изучение открывает перспективы реконструкции геологических, литодинамических и других палеопроцессов, что имеет как научное, так и прикладное значение.

Материалы исследований и их обсуждение

Аппаратура и методика работ. Сейсмоакустический комплекс «Геонт-шельф» включает:

- сейсмический накопитель энергии SPES-600: блок управления разрядом и блок высоковольтных конденсаторов,
- устройство ввода сейсмических сигналов PSA-1,
- заборную буксируемую часть: излучатель спаркера и приемную антенну (сейсмокошу),
- соединительные высоковольтные кабели.

Основные технические характеристики.

Сейсмический накопитель энергии предназначен для накопления на конденсаторах высоковольтной электрической энергии и последующего быстрого разряда энергии в электроискровой или электродинамический излучатель упругих колебаний при сейсмических исследованиях на акваториях.

Основные характеристики накопителя:

- рабочее напряжение до 5 кВ;
- рабочая емкость 50 мкф; имеется возможность рабочую емкость увеличить с шагом 40 мкф до 290 мкф;
- потребляемая мощность до 3кВА

Устройство PSA-1 предназначено для ввода сейсмических сигналов в персональный компьютер и для управления работой сейсмического источника при одноканальных исследованиях методом НСАП. Вместе с персональным компьютером и специализированным программным обеспечением, устройство представляет собой систему сбора данных сейсмоакустического комплекса «Геонт-шельф».

Забортная буксируемая часть оборудования состоит из:

- многоэлектродного излучателя спаркера (на 64 потенциальных электрода);
- приемной антенны: 25-ти метровой сейсмической косы с 10 пьезоприёмниками, помещенными в полиуретановый шланг с шагом 2 метра и залитыми жидким парафином;
- буксировочной штанги («выстрел») длиной 5 метров с оттяжками из капронового фала;
- буксировочного кабеля излучателя спаркера и приемной сейсмокосы;

Позиционирование каждой сейсмоакустической трассы, записываемой профилографом с электроискровым источником во время съемки по галсу, обеспечивалось с помощью спутниковой навигационной системы GPS «Trimble» NT300D.

Параметры регистрации. Перед началом работ проводилась настройка аппаратуры сейсмической съёмки. Были выполнены настроечные записи НСП, по которым установили следующие параметры регистрации:

- мощность излучателя не менее 600 Дж при $C = 50$ Мкф;
- диапазон частот 100 – 1200 Гц;
- период излучения 1.5 сек;
- усиление $20 \times 100 = 2000$;
- время регистрации $100 \text{ мкс} \times 4000 = 400 \text{ мс}$;
- скорость судна 6 - 8 узлов.

По мере изменения глубин параметры регистрации менялись.

Кроме профилографа с источником типа «спаркер», для изучения придонной части разреза, в указанных рейсах применялся высокочастотный профилограф АП-5 и бортовой эхолот [5].

Результаты

Выполненные регионально-рекогносцировочные галсы сейсмоакустических профилей в пределах шельфа и склона юго-восточного Крыма и северо-западного Кавказа позволили выделить три основных сейсмогеологических комплекса в пределах прибрежно-шельфовой части моря, а также осадочные образования в глубоководной и склоновой его частях [4-6].

Выделенные три сейсмических комплекса включают: 1 – акустический фундамент (таврическая серия Т₃-J₁ в крымской части и флишевые отложения в кавказской части К₂-N₁); 2 – слоистую толщу с субпараллельными отражающими границами (средний сейсмокомплекс N); 3 – толщу с крупными аккумулятивными клиноформами, многочисленными косо наклоненными отражающими горизонтами (верхний сейсмокомплекс N-Q).

Верхний сейсмокомплекс состоит из четырех косослоистых подкомплексов, самый верхний из которых (QIII_{ne}) расположен вблизи поверхности дна и перекрывается небольшой по мощности (около 2-5 м) толщей горизонтально-слоистых осадков (QIV). Со всеми косослоистыми подкомплексами связаны поверхности выравнивания, протягивающиеся в сторону берега и являющиеся продолжением кромок этих тел.

Отмечено два типа бровки – резкий и плавный. Резкий перегиб, чаще всего, обусловлен процессами новейшей тектоники и связан со сбросами, а плавный – сглажен голоценовой седиментацией. Происходившие в новейшее время морфоструктурные преобразования внешнего шельфа и верхней части материкового склона вполне отчетливо отражались в специфических чертах и характере строения бровки шельфа. Новейшая тектоническая активность отражена также в преобразовании внешней зоны материковой отмели.

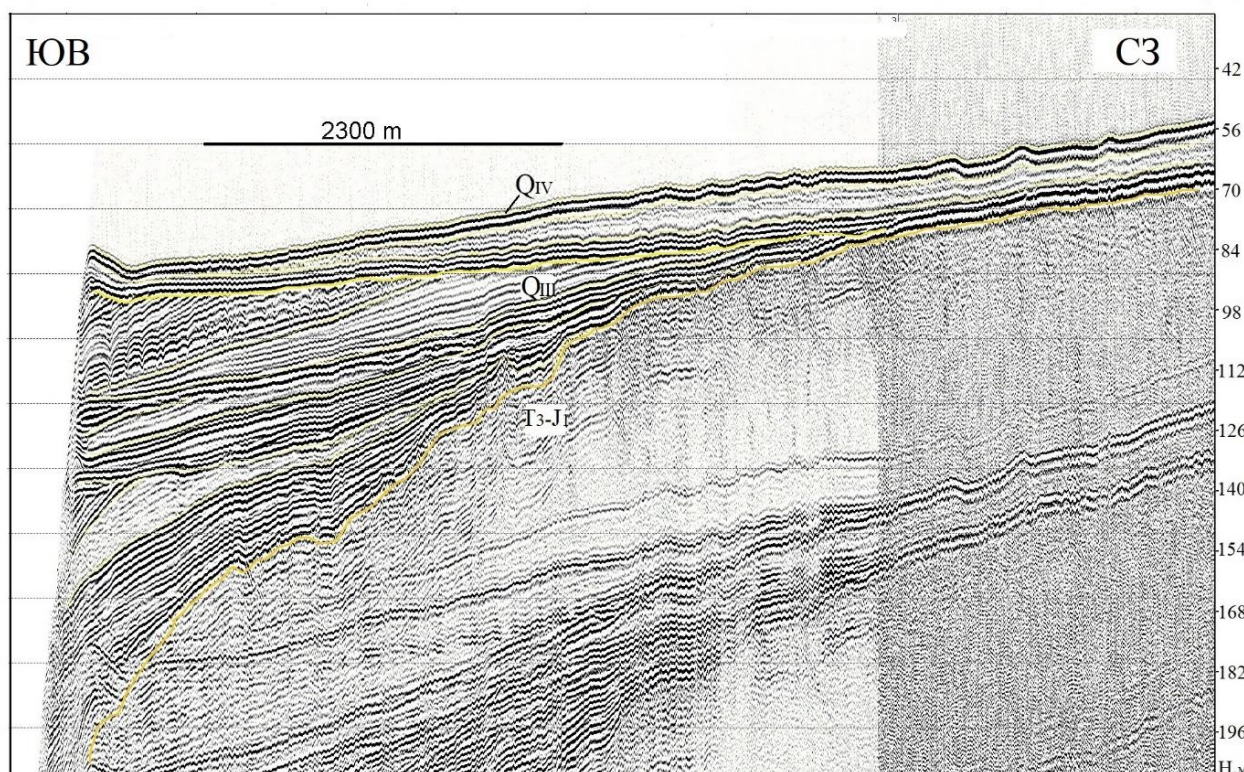


Рис.1. Фрагмент разреза НСАП в районе Алушты, показывающий сейсмокомплексы в шельфовой части района исследования.

Верхняя часть материкового склона сложена разновеликими выступами. Их вершинные поверхности представлены тектонически расчлененным рельефом. По ряду морфологических

признаков есть основание предполагать, что выступы представляют собой относительно крупные оползневые блоки, возможно, сбросы.

Материковый склон сильно расчленен густой сетью подводных долин и каньонов. Предполагается, что большинство из них простирается вдоль разломов, обусловивших их залегание. Дальнейшее их развитие связано с эрозионными процессами. Продольные (относительно бровки шельфа) разломы, по-видимому, меньшей протяженности, могли способствовать дроблению материкового склона на разновеликие блоки.

Каньоны и долины материкового склона сопряжены со сложно построенными грядами.

Склоны гряд осложнены мелкими врезами, узкими ступенями, невысокими уступами и, по-видимому, обусловлены зоной разломов. Вполне вероятно, что они играли существенную роль не только в неотектонической перестройке суши, но и шельфа [1,7].

Появлению различных кривых хода уровня моря способствовало разнообразие геологических условий на побережьях. Следовательно, часть кривых, представленных исследователями как «ход уровня моря», на самом деле являются локальными (относительными) кривыми, поскольку в них включены вертикальные перемещения земной коры, присущие месту проведения геологических исследований. При этом, роль вертикальных движений земной коры в локальных изменениях уровня моря может быть гораздо значительней, чем эвстатических изменений уровня. В зависимости от скорости тектонических движений смещается время начала вторичных флуктуаций уровня. Т.е. вертикальные движения земной коры даже с постоянной скоростью (не говоря уже о возможных изменениях скорости в реальных процессах) смещают в локальных кривых время начала и завершения вторичных трансгрессий и регрессий эвстатического уровня.

Отдельная локальная кривая хода уровня моря, построенная геологическими методами, сама по себе практически не даёт информации об эвстатической составляющей процесса. Она становится информативной, если известны направление и скорость вертикальных движений земной коры в районе исследований. При этом для определения эвстатического хода уровня моря в прошлом необходимо знать, как скорость вертикального движения участка побережья изменялась во времени [2-3].

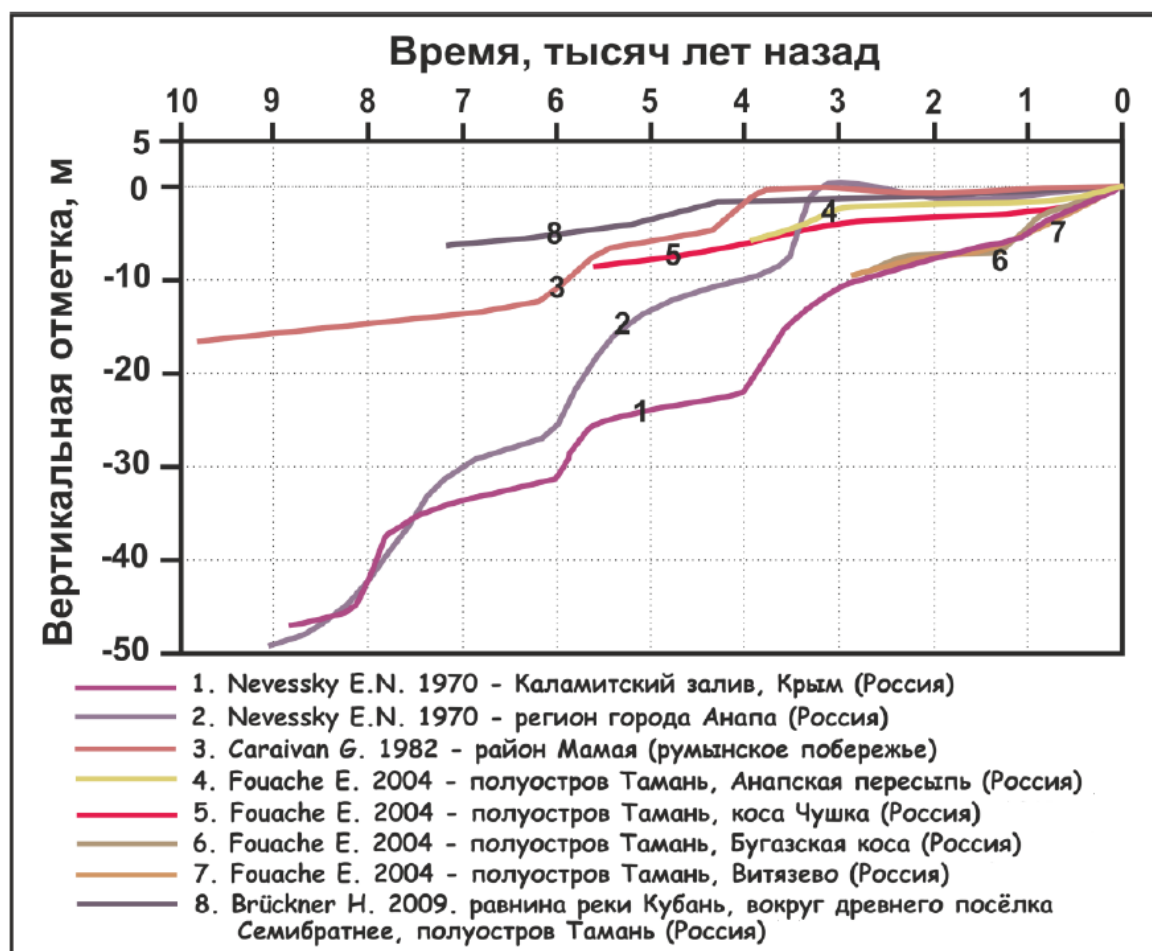


Рис.2. Локальные кривые изменения уровня Чёрного моря в голоцене полученные разными авторами для разных участков побережья (Есин Н.И., 2015).

Особенно серьёзное искажение в форму локальных кривых могли вносить катастрофические процессы. Поэтому для расчетов эвстатических изменений уровня следует выбирать локальные кривые, полученные на участках побережья предположительно наименее подверженных катастрофическим процессам, т.е. с постепенными, вертикальными движениями земной коры.

Заключение

1. На основе полученных материалов могут быть построены геоморфологические карты и схемы, которые могут быть надежной основой для дальнейших построений.
2. Процесс эволюции крымско-кавказской материковой окраины в плейстоцен- голоценовое время происходил ритмично, с усилением одних и ослаблением других факторов. При этом ведущее место занимали неотектонические движения (вертикальные и горизонтальные) разного знака.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2021-0010, № 0128-2021-0013).

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО Южморгеология” Андрееву В.М., Шельтингу С.К., Шейкову А.А., Карпенко Г.Е. за ценные консультации.

Список литературы:

1. Евсюков Ю. Д., Шимкус К. М. Новые данные по геоморфологии и неотектонике материковой окраины в районе Керченского пролива // Доклады Академии наук. – 1995. – Т. 344, № 1. – С. 83–86.
2. Есин Н.И., Есин Н.В. Опыт изучения изменений уровня Черного моря в последние 20 тысяч лет математическими методами // Материалы XXV Международной береговой конференции: Береговая зона - Взгляд в будущее. Сочи, Россия. – 2014. – С. 17-19.
3. Есин Н.В., Есин Н.И. Об изменении уровня Мирового океана в голоцене // Доклады Академии Наук. – 2012. – Т. 447. – № 5. – С. 568–570.
4. Иванов В.В., Коротаев В.Н., Мысливец В.И., Поротов А.В., Пронин А.А., Римский-Корсаков Н.А., Тихонова Н.Ф. Геофизические и гидрографические изыскания на восточном шельфе полуострова Крым (Феодосия-Керчь-Анапа). Океанологические исследования. 2018. Том 46. № 1. С. 82–101.
5. 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.
6. Хортов А. В., Римский-Корсаков Н. А., Пронин А. А., Мутовкин А. Д. Сейсмостратиграфические исследования крымского шельфа методом непрерывного сейсмоакустического профилирования. ДАН РАН, науки о земле, 2023, том 512, № 2, с. 134–140
7. Щербаков Ф. А., Есин Н. В. Особенности рельефа бровки шельфа Северного Кавказа // Океанология. – 1994. – Т. 32, № 2. – С. 283–286.

УДК 551.462.8

Рубрика 38.47.19

ПРОЯВЛЕНИЯ ОСАДОЧНОГО КРИПА НА СКЛОНАХ КОТЛОВИНЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

OCCURRENCE OF SEDIMENTARY CREEP ON THE SLOPES OF THE BLACK SEA BASIN

Миرونюк Сергей Григорьевич¹, Росляков Александр Геннадьевич¹

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва

Mironyuk Sergey Grigorievich¹, Roslyakov Alexander Gennadievich¹

¹MSU M. V. Lomonosov, Moscow

Введение

В процессе проведения морских инженерных изысканий для строительства подводных трубопроводов в Черном море (1996-2014 гг.), постановки буровых платформ на точку бурения и т. д. был выполнен большой объем инженерно-геологических изысканий, включая исследования склоновых процессов в различных морфологических зонах указанного бассейна [Ионов и др., 2012; Миرونюк, Кропоткин, 2020; Миرونюк, Кропоткин и др., 2020; Миرونюк, Росляков и др., 2021; Москаленко, Шимкус, 2005].

Опасные склоновые процессы: оползни, обвалы (камнепады) и гравитационные потоки широко распространены на континентальном склоне котловинных морей с орогенным тектоническим режимом (Средиземное, Черное моря, южная часть Каспийского моря и др.) представляют реальную угрозу для линейных объектов (трубопроводов, кабелей связи) и буровых платформ, подводных аппаратов и т. д. Обвалы и оползни в акваториях возникают на крутых склонах хребтов, каньонов, долин, конусов выноса и т. д. Оценка геологических опасностей по трассе трубопроводов Россия-Турция («Голубой поток»), Южный поток показала, что наибольшую опасность для целостности трубопроводов на континентальном склоне представляют оползни и обломочные потоки различного состава. Эти процессы отнесены к категории «весьма опасных» геологических событий, имеющих поперечную составляющую нагрузки на трубопровод, вызывающую значительные изменения в его напряженно-деформированном состоянии. Помимо указанных процессов в морях, широко распространен [Silva, Booth, 1984-1985], еще слабо изученный [Рычагов, 2006] осадочный (склоновый) крип (от сгеер – сползание, термин предложен В. М. Дэвисом, 1899) [Обстановки осадконакопления и фации..., 1990; Рукавишникова, 2017]. Этот процесс, согласно общей классификации гравитационных процессов [Якушова, Хаин и др., 1988], относится к криповой группе собственно гравитационных процессов. Она включает в ранге типа просадку и крип склоновый. Характерно, что среди подводно-гравитационных процессов крип, в указанной работе не упомянут [Якушова, Хаин и др., 1988]. Он включен позже в классификацию подводных гравитационных процессов разработанную А. С. Поляковым [Поляков, 2000]. В зарубежной литературе еще в 60-х годах прошлого века большое внимание уделялось

специфическому подводному крипу песков [Shepard, Dill et al., 1969]. В частности, в указанные годы было обнаружено явление оптимального уплотнения песков в процессе крипа. На сегодняшний день установлено, что осадочный крип представляет собой процесс медленного сползания или оплывания, обусловленный постоянной нагрузкой, вызывающей напряжения, которые могут длиться от нескольких часов до тысяч лет [Watkins, Kraft, 1978]. Крип может ускоряться за счет увеличения веса отложений или сейсмических нагрузок, предваряя начальный этап формирования оползней [Hampton, Lee et al., 1996]. К числу триггерных механизмов вязкотекучего движения слоя осадков следует отнести и увеличение порового давления в отдельных приповерхностных горизонтах скопления газа, в т. ч. за счет разложения газогидратов [Иванова и др., 2017; Рукавишникова, 2021].

Крип возникает даже на пологих (1° - 2°) склонах, при этом мощность осадков, вовлеченных в осадочный крип может достигать 20-80 м [Nardin et al., 1979]. Расчеты и моделирование показали, что на склоне крутизной 5° скорость крипа тонкозернистых осадков не превышает 3 см/год. По мере увеличения крутизны склона скорость их смещения резко возрастает [Silva, Booth., 1984 -1985].

Методы и средства выполнения отдельных видов работ

Изучение проявлений склоновых процессов на площадках (трассах) строительства морских сооружений выполнялись с применением геофизических методов. Применялись многолучевой эхолот (МЛЭ) «Reson SeaBat 8160» и узколучевой параметрический профилограф «Innomar SES 2000 medium». Съёмка рельефа дна МЛЭ обеспечила построение цифровой модели рельефа. Основные технические характеристики профилографа следующие: первичная частота (высокочастотный канал) 100 кГц; вторичная частота (низкочастотный канал) 6-12 кГц.

Для предварительного расчленения геологического разреза на отдельные слои и оценки свойств грунтов использовалась система статического зондирования Neptune 5000 и пробоотбор с помощью гравитационно-поршневого пробоотборника GEO Piston Corer, гравитационной прямооточной трубки диаметром 130 мм и длиной 4 м, коробчатого пробоотборника и др. с последующим полевым описанием колонок донных отложений и определением их состава и свойств.

На этапе детальных комплексных изысканий съёмка рельефа выполнялась с использованием автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) «HUGIN». МЛЭ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП) регистрировались одновременно. Ширина участка съёмки – 1 км, расстояние между профилями – 150-200 м, Превышение АНПА над поверхностью дна составляла 45 - 50 м. НСП: полоса частот 1-6 кГц, Глубина проникновения сигнала - до 80 м, вертикальная разрешающая способность – 0.3 м. ГЛБО: частота - 100 кГц, полоса обзора - 295 м в каждую сторону. МЛЭ: Simrad EM 2000, частота излучения 2 кГц, количество лучей – 111, угол развертки - 150° . Размер ячейки матрицы - 5x5 м. Глубинность проведенных исследований составляет порядка 60-80 м ниже поверхности морского дна.

Результаты. Характеристика и признаки проявлений крипа осадков

Отчетливые, морфологически выраженные на морском дне признаки крипа были выявлены в восточной (аккумулятивный склон в пределах конуса выноса пра-Дона [Rybalko et al., 2021]) и

западной (наклоненная эрозионно-аккумулятивная равнина континентального склона (по [Какаранза, 2007]) частях Черного моря.

Конус выноса пра-Дона. Участок исследований расположена в западной части акватории российского сектора Чёрного моря в диапазоне глубин моря от 1700 м до 2200 м. Расположен в дистальной части конуса выноса и характеризуется пологой волнистой поверхностью, интенсивно расчленённой протяжёнными реликтовыми каньонами и долинами, и развитой оползневой зоной в западной его части. В частности, непосредственно на участке исследований обнаружено погребенное оползневое тело, перекрытое маломощной толщей новочерноморских, древнечерноморских голоценовых и новозвксинских илов (поздний неоплейстоцен-голоцен) [Хлебникова и др., 2018]. Мощность голоценовых отложений в среднем составляет около 0.8-1.0 м, а поздненеоплейстоцен-голоценовых 2.8-6.4 м. Указанные неконсолидированные грунты характеризуются высокой влажностью (46 -192 %) и чрезвычайно низкой прочностью ($c = 4-8$ кПа, $\varphi^{\circ} = 6^{\circ}-11^{\circ}$). Плотность их составляет 1.29-1.70 г/см³. В нижней части аккумулятивного склона при уклонах дна более 2° проявляются гравитационные смещения грунтов по типу подводной солифлюкции образующие накопления подводно-солифлюкционных осадков [Панов,1963; Фролов,1984]. Признаками подводной солифлюкции на донной поверхности участка являются иловые валы (их отдельные фрагменты) часто зигзагообразной в плане формы высотой 0.5-1.5 м и длиной от первых десятков метров до 700-1000 м и ложбины, которые соответствуют структурам растяжения. Мощность солифлюкционных отложений (морского солифлюксия), составляет обычно 0.5-2.0 м. От подводных оползневых отложений «они отличаются отсутствием четко выраженного базиса смещения, меньшими размерами» [Фролов,1984]. В геологических разрезах морской солифлюксий представлен обычно маломощными слоями мелкоскладчатых отложений [Методическое пособие..., 2005]. Для них характерна хаотическая волновая картина (рис.2).

Прямым признаком собственно осадочного крипа (процесса медленного сползания или оплывания толщ осадков на относительно пологих склонах) наклонное залегание слоев новозвксинских осадков (вплоть до 55° - 65°) [Архангельский, Страхов,1938] и разрывы сплошности слагающей ими осадочной толщи (рис. 1).

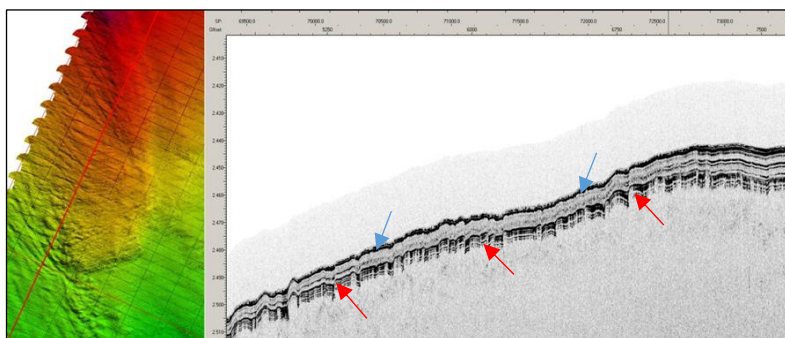


Рис. 1. Крип и зона нарушения слоистой структуры осадков. Слева фрагмент карты батиметрии морского дна с показанным красной линией положением разреза. Красными стрелками показан крип осадков, синими – зона нарушения слоистости с хаотической волновой картиной (признак солифлюкции).

Наклоненная эрозионно-аккумулятивная равнина континентального склона. Изученный участок относится к Камчийской морфоструктуре западного континентального склона Черноморской впадины (болгарский сектор). Камчийская морфоструктура располагается на восточном морском продолжении Нижне – Камчийского краевого прогиба и в плиоцен – четвертичное время испытывала унаследованное устойчивое прогибание. Граница между

Камчийской морфоструктурой и глубоководной впадиной проявляется в виде пологой флексуры и не сопровождается разрывными нарушениями [Геолого - геофизические исследования Болгарского сектора..., 1980]. Глубина моря в районе исследований изменяется от 132 до 2129 м. Наиболее важной особенностью морфологии данного участка континентального склона, в отличие от смежных северо-болгарского и южно-болгарского участков склона, является относительно незначительная поперечная расчлененность рельефа подводными каньонами и долинами, а также почти постоянный уклон дна, составляющий от 1-2° до 3-4°. Верхняя часть разреза мощностью 0.7-6.7м сложена новочерноморскими и древнечерноморскими глинистыми илами. Ниже залегают глины и суглинки текуче - и мягкопластичной консистенций мощностью (по результатам пробоотбора и геофизическим данным) 11.5-15.5 м. Отличительной особенностью участка является также широкое распространение склоновых процессов и коррелятных им отложений: оползневых, солифлюксия, осадков обломочных потоков различного состава. Многие оползневые тела, как и на аккумулятивном склоне в пределах конуса выноса пра-Дона, являются погребенными. Кроме того, здесь, впервые было зафиксировано явление палеокрипа. На многих участках склона сейсмоакустическим профилированием выявлен специфический разрез, состоящий из двух пачек осадков: верхней горизонтально-слоистой мощностью 20 - 25 м и лежащей ниже пачки с серией экзогенных («безкорневых») разрывных нарушений с амплитудой смещения слоев не более 1.0 -1. 5 м.

К числу признаков подводной солифлюкции на данном участке относятся натечные микроформы - узкие валы подковообразной, Г – образной или зигзагообразной формы длиной от 50 до 200 м и высотой 1.5 -2.0 м связанные со смещением придонного слоя глинистых илов (рис.2).

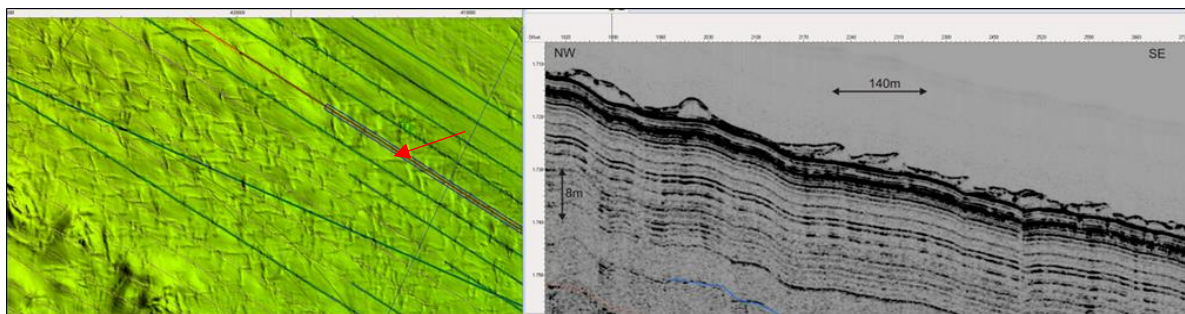


Рис.2. Натечные формы микрорельефа на центральном участке болгарского континентального склона, образованные подводной солифлюкцией (слева-ЦМР и положение сейсмоакустического профиля (стрелка), справа – временной разрез).

Современный осадочный крип идентифицирован по наличию в приповерхностные толще осадки мощностью 25-55 м многочисленных разрывных нарушений с амплитудой смещения слоев и, в ряде случаев, поверхности дна до 1-2 м, наклонных слоев (до 40°). Иногда наблюдается уменьшение амплитуды вертикальных смещений слоев вверх по разрезу и появление пликативных деформаций в наиболее молодых осадках. К числу факторов, способствующих проявлению крипа, относятся приповерхностные газовые скопления и, в целом, газонасыщенность осадков верхней части разреза. Неоднократно на временных разрезах наблюдались газовые аномалии в подошве пачки (наиболее вероятный базис смещения) затронутой крипом и «вторичные» скопления газа, возникшие благодаря миграции флюидов по разрывные нарушения к донной поверхности и способствующие смещению самого верхнего флюидизированного слоя по типу солифлюкции.

Заключение

Выполненное обобщение материалов инженерно-геологических изысканий осуществленных для строительства морских сооружений в Черном море в части оценки опасности крипа показало следующее. В верхней части геологического разреза континентального склона указанного морского бассейна имеются отчетливые признаки двух типов гравитационных процессов: подводной солифлюкции и собственно осадочного крипа. Современной подводной солифлюкцией подвержены придонные, преимущественно голоценовые глинистые илы. Для них типична хаотическая волновая картина. На донной поверхности признаками данного процесса являются разнообразные натечные формы микрорельефа. Мощность осадков, вовлеченных в подводную солифлюкцию составляет ~ 2.5-5.0 м. Зоны развития солифлюкции должны учитываться при выборе мест установки якорей, поскольку грунты, развитые в их границах, характеризуются чрезвычайно низкими прочностными свойствами.

Осадочный крип развивается в толще глин и суглинков текуче - и мягкопластичной консистенций мощностью ~25-55 м. Признаками этого процесса являются нередко наклонное залегание слоев и разрывы их сплошности. Не исключено, что при сейсмических нагрузках криповое смещение может ускориться, трансформируясь в оползневой процесс, с образованием на месте криповых разрывных нарушений трещин отрыва. Вероятность реализации такого сценария необходимо учитывать при выборе трасс трубопроводов и площадок установки морских буровых платформ и, по возможности, обходить подобные участки.

Список литературы:

1. Архангельский А.Д., Страхов Н.М. Геологическое строение и история развития Черного моря. М.; Л.: Изд-во АН СССР. – 1938. – 226 с.
2. Геолого - геофизические исследования Болгарского сектора Черного моря. БАН София.1980. – 319 с.
3. Иванова А. А., Миронюк С. Г., Росляков А. Г., Хлебникова О. А. Опасные геологические процессы и явления на континентальном склоне Западно- Черноморской впадины // Труды VI Международной научно-практической конференции Морские исследования и образование (MARESEDU-2017). ООО ПолиПРЕСС Тверь: – 2017. – С. 249-253.
4. Ионов В. Ю., Калинин Э.В., Фоменко И. К., Миронюк С. Г. Условия формирования подводных оползней в отложениях бровки континентального склона Черного моря в районе поселка Архипо-Осиповка // Инженерная геология. – 2012. – № 5. – С. 36-46.
5. Какаранза С. Д. Условия осадконакопления переходной зоны от северо-западного шельфа к глубоководной впадине Черного моря в позднеплейстоцен-голоценовое время: автореф. дис... канд. геол. наук. Киев. – 2007. – 37 с.
6. Методическое пособие по составлению мелкомасштабных карт четвертичных образований к Госгеолкарте-1000/3/Ред. Е.А. Минина, В.В. Старченко. Изд-во ВСЕГЕИ. – 2005. – 190 с.
7. Миронюк С. Г., Кропоткин М. П. Возможный механизм и причины образования Утришских оползней суши и шельфа (полуостров Абрау) // Закономерности формирования и воздействия морских, атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону

РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов (Опасные явления – II). ЮНЦ РАН Ростов-на-Дону: 2020. – С. 52–57.

8. Миронюк С. Г., Кропоткин М. П., Безуглова Е. В. Основные типы склоновых процессов на шельфе и континентальном склоне Черного моря в районе п-ова Абрау и оценка их опасности при проведении инженерно-геологических изысканий // Инженерные изыскания. – 2020. – Т. 14. – № 6. – С. 24–38.
9. Миронюк С. Г., Росляков А. Г., Мысливец В. И., Хлебникова О. А. Глубоководные конусы выноса пра-Дона и пра-Кубани - области высокого геологического риска // Геориск. – 2021. – Т. 15. – № 1. – С. 44–56.
10. Москаленко В.Н., Шимкус К.М. Оползневые образования и отложения турбидитовых потоков на кавказском материковом склоне Черного моря // Бюллетень МОИП. Отд. геологии. – 2005. – Т. 80. Вып. – 6. – С. 33-38.
11. Обстановки осадконакопления и фации: в 2-х т. Т. 2: Пер. с англ./ Под ред. Х. Рединга. – Мир, 1990. – 384 с.
12. Панов Д. Г. Морфология дна Мирового океана. Изд-во АН СССР. М.; Л.: 1963. – 228 с.
13. Поляков А. С. Классификация субаквальных гравитационных процессов седиментогенеза //Материалы 1-го Всероссийского литологического совещания «Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса». Москва, 19-21 декабря. М.: Геос, 2000. – Т.2. – С. 121-126.
14. Рычагов Г. И. Общая геоморфология. М.: Наука. – 2006. – 416 с.
15. Рукавишникова Д. Д. Строение осадочной толщи и проявление крипа на восточном склоне Татарского трога, Японское море //Комплексные исследования Мирового океана. – 2017. – С. 511-513.
16. Рукавишникова Д. Д. Факторы, приводящие к образованию подводных оползней на склонах о. Сахалин //Комплексные исследования Мирового океана. Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования Мирового океана». – 2021. – Т. 18. – С. 432-433.
17. Фролов В. Т. Генетическая типизация морских отложений. М.: Недра. – 1984. – 222 с.
18. Хлебникова О.А., Иванова А.А., Никишин А.М., Росляков А.Г., Старовойтов А.В. Анализ гравитационных отложений материкового склона и его подножия в северо-восточной части Черного моря. Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2018; (6):29-36. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2018-6-29-36>
19. Якушова А. Ф., Хаин В. Е., Славин В. И. Общая геология. – М.: Изд-во МГУ. –1988. – 448 с.
20. Hampton M.A. Lee H.J. &Locat J. Submarine Landslides //Reviews of Geophysics. – Vol. 34. – №1. – 1996. – P. 33-59.
21. Nardin, T. R., Hein, F. J., Gorsline, D. S., and Edwards, B. D. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics, and contrasts in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basin floor systems // Geology of Continental Slopes: SEPM Special Publication 27. –1979. – P. 61-73.

22. Rybalko A.E., Tokarev M.Yu., Terekhina Ya.E., Loktev A.S., Mironyuk S.G., Roslyakov A.G., Shcherbakov V.A., Kolyubakin A.A. The Use of Geophysical Methods for Solving a Wide Range of Problems in The Geoecology of Seas and Large Lakes // Engineering and Mining Geophysics 2021, Apr 2021. – P.1–8 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152146>.
23. Shepard F. P., Dill R. F., von Rad U. Physiography and sedimentary processes of La Jolla submarine fan and fan-valley, California// American Association of Petroleum Geologists Bulletin. – 1969. – Vol. 53. – P. 390–420, doi: 10.1306/ 5D25C7AF-16C1-11D7-8645000102C1865D.
24. Silva A.J., Booth J.S. Creep behavior of submarine sediments//GeoMar. Lett. –1984-1985. –Vol. 4, – № 3-4. – P. 215-219.
25. Watkins D. J., Kraft Jr L. M. Stability of continental shelf and slope off Louisiana and Texas: geotechnical aspects // Framework, Facies, and Oil Trapping Characteristics of the Upper Continental Margin, ed. A. Bouma, G. T. Moore, J. M. Coleman, 7. Tulsa, Okla: Am. Assoc. Pet. Geol. – 1978. – P. 267-286.

УДК 551.35:550.394:551.24

Рубрика 38.47.00

ПАЛЕОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЛИТОДИНАМИКА
ПОБЕРЕЖЬЯ О. ИТУРУП (КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

PALEOSEISMOLOGICAL STUDIES AND LITHODYNAMICS OF THE ITURUP ISLAND
COAST (KURIL ISLANDS)

Хомчановский Антон Леонидович, Батанов Филипп Игоревич

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

Khomchanovskiy Anton Leonidovich, Batanov Filipp Igorevich

Institute of volcanology and seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky

Введение

Итуруп является крупнейшим островом Курильской гряды. Его площадь составляет 3175 кв. км. Курильская островная дуга расположена на активной континентальной окраине вдоль Курило-Камчатской зоны субдукции. Остров Итуруп расположен в ее южном сегменте на расстоянии около 200 км от желоба. Глубина слэба составляет около 50 км под восточным участком побережья и 70 км – под западным (рис. 1). Согласно ранее проведенными нами палеосейсмологическими исследованиями на таком расстоянии от глубоководного желоба при сильных землетрясениях могут происходить косейсмические опускания поверхности от 0.5 до 2 м [3,4,10]. Такие же деформации отражены в моделях Сатаке и Окада [9,11].

Материалы и методы

Палеосейсмологические исследования подразумевают под собой поиск геологических доказательств сильных землетрясений, определения их местоположений и датирование этих событий. Поскольку на основании ранее проведенных исследований аккумулятивных террас на Камчатке было выяснено, что на расстоянии порядка 200 км от желоба происходят опускания, было принято решение искать именно их, по ранее отработанной методике [3,10]. Косейсмические опускания на побережьях лучше всего отражаются в изменении высоты береговых валов, погребенных под этими валами уступах размыва и смене условий осадконакопления в близлежащих торфяниках.

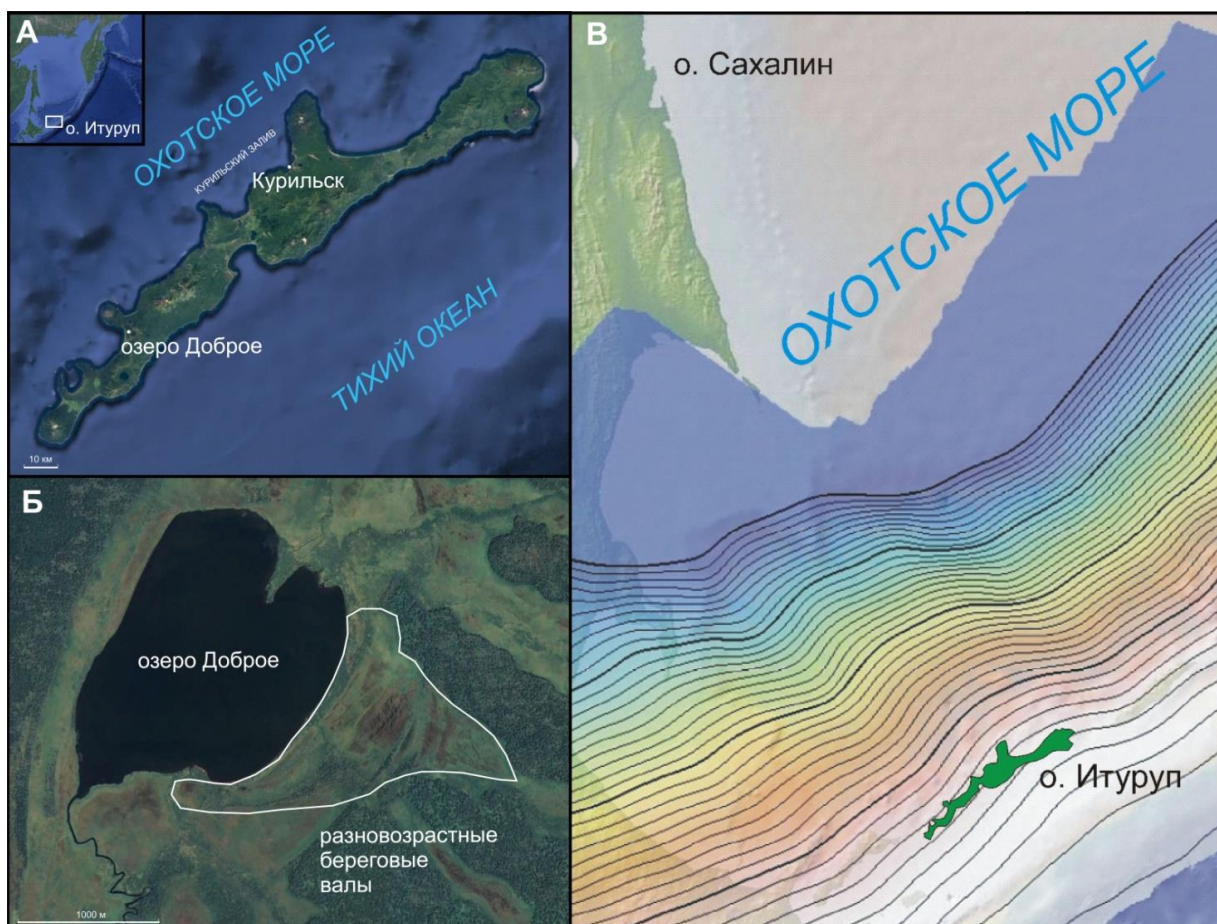


Рис. 1. А – расположение района исследований; Б – озеро Доброе с серией береговых валов; В – глубина погруженной Тихоокеанской плиты в районе Курильских островов, основные горизонталы проведены через 100 км, промежуточные – через 10 км (<https://www.geomapapp.org>).

В первую очередь на спутниковых снимках был найден наиболее перспективный участок с сохранившимися береговыми валами на берегу оз. Доброе (рис. 1). Ранее на о. Итуруп были проведены тифрохронологические работы с целью установить маркирующие пеплы для данной территории. На некоторые из этих пеплов мы ориентировались в данных исследованиях. Непосредственно в районе оз. Доброго была проведена нивелировка береговых валов для установки разницы их высот. Далее закладывались шурфы и скважины в крест простирания валов и на торфяниках. Методика и результаты вышеописанных палеосейсмологических исследований более подробно отражены в следующих работах [3,4]. В данном районе были найдены следы шести сильных землетрясений, которые вызвали косейсмические опускания. Средний интервал между ними примерно 330 лет. Последнее землетрясение, вероятно, произошло в 1958 г. Амплитуда опускания составила 30 см [4].

Результаты вышеописанных исследований позволили предположить, что после мощных землетрясений существует опасность разрушения берега не только от цунами, но и из-за изменения относительного уровня моря, вызванного косейсмическим опусканием побережья. Причем такая опасность имеется не только с тихоокеанской стороны, (где расположен Курило-Камчатский желоб) но и со стороны Охотского моря. Видимо, во время наиболее сильных землетрясений может опускаться весь остров. Такие выводы нам позволил сделать найденный на берегу оз. Доброго погребенный абразионный уступ, а также мертвый лес на древних береговых валах [4] (рис. 2). Аналогичный мертвый лес был найден американскими учеными в районе Каскадии, США [7].

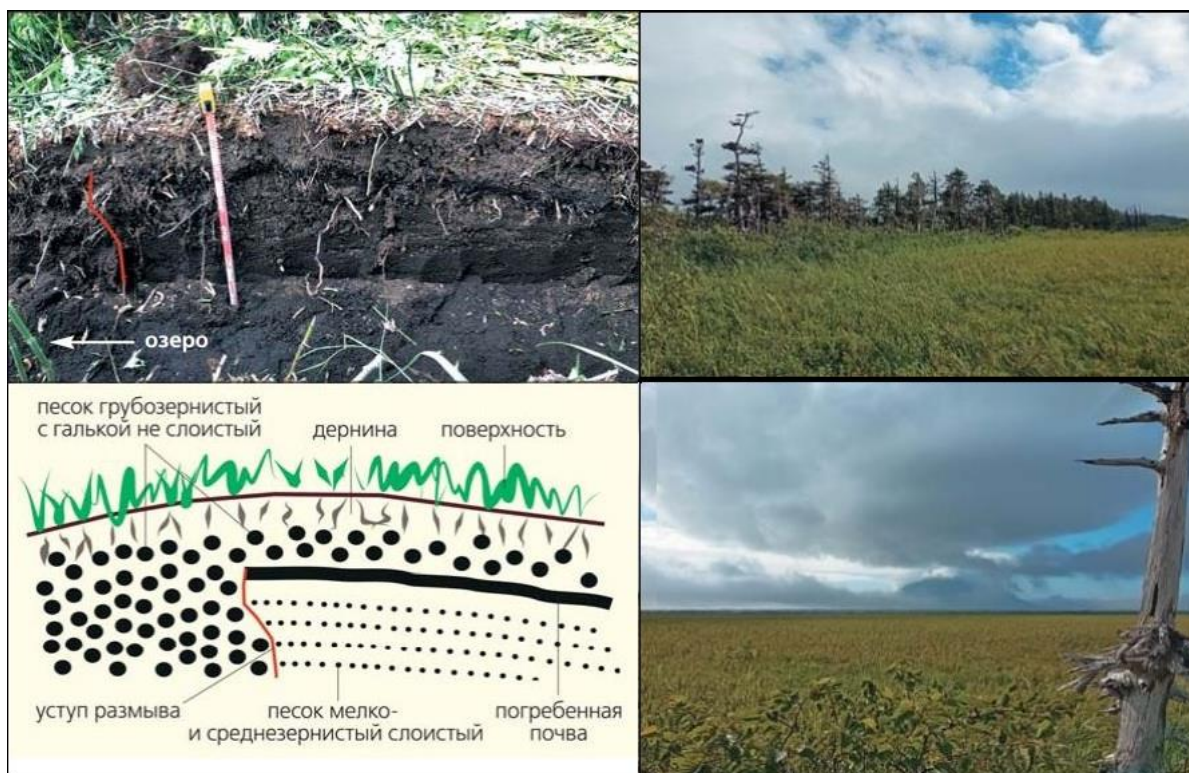


Рис.2 Слева – фото погребенного уступа с приведенной ниже схемой; справа – фото погибших деревьев

Было решено провести математическое моделирование отступления берега при относительном изменении уровня моря. Наиболее классическая и универсальная модель для этих целей – модель Бруна-Зенковича. Эта двухмерная модель хорошо отражает отступление береговой бровки в зависимости от изменения уровня моря, хотя и не лишена недостатков (например модель не учитывает общий баланс наносов и другие морфо- и литодинамические изменения несвязанные с уровнем). Модель Бруна-Зенковича математически описывает реакцию берега на относительное повышение уровня моря, согласно которой береговая линия будет сдвигаться в сторону суши и описывается формулой [8]:

$$R = \frac{L}{B + h_*} S \quad (1)$$

где R – смещение берега; S – изменение уровня водоема; L – расстояние активной части профиля от пляжа до глубины замыкания h_* ; B – высота бермы.

Обсуждение и результаты

В рамках данной работы было проведено численное моделирование отступления берега после относительного подъема уровня моря, связанного с косейсмическим опусканием поверхности. Основным участком для моделирования был выбран Курильский залив (рис. 1). Здесь расположен крупнейший населенный пункт острова г. Курильск и сосредоточена вся основная инфраструктура. Дорога Курильск-Рыбаки протяженностью около 3 км располагается всего в 30-100 м от активного берегового уступа. Данными фактами подтверждается не только научная, но и практическая актуальность исследования. Поскольку г. Курильск расположен примерно на таком же расстоянии от глубоководного желоба, что и оз. Доброе (где были найдены геологические доказательства косейсмических

опусканий) можно предположить, что подобные сильные землетрясения могут вызывать схожие последствия.

Для численного моделирования была выбрана известная модель Бруна-Зенковича. Описание данной модели приведено в работах [8, 11]. Ее практическая работоспособность подтверждена в следующих публикациях [2, 5].

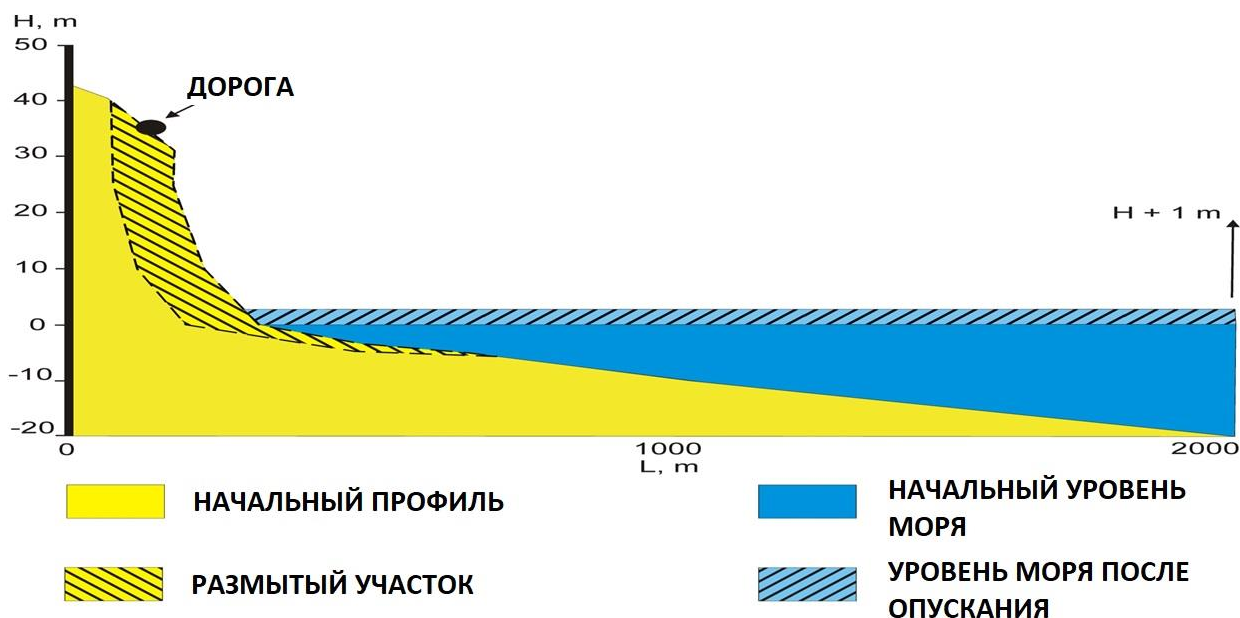


Рис.3 – схематичный пример опускания берега на 1 метр по профилю, указанному на рис. 4

Расчеты по формуле Бруна показали следующую рецессию берега при соответствующих опусканиях берега: при опускании на 0.5 м, рецессия – 85 м, при опускании на 1 м, рецессия – 170 м, при опускании на 2 м – 340 м (рис. 3).



Рис.4 Схема затопления берега при возможном опускании

Из данных расчетов, очевидно, что даже при минимальных амплитудах опускания, которые происходили менее 100 лет назад, существует опасность для инфраструктуры острова (рис. 4). Из подобных работ [6] натурно доказано, что размыв может продолжаться до 20 лет, а восстановление берега до прежних параметров при тех же условиях – около 40 лет. Однако, для моделирования более точных количественных показателей необходимо проводить дополнительные исследования.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке НИР № 0282-2019-0005 (FWEW-2019-0005) «Глубинное строение, сейсмичность и геодинамика Курило-Камчатской островодужной системы», руководитель А.И. Кожурин и Российского научного фонда (проект 21-17-00049, руководитель академик РАН Е.И. Гордеев). <https://rscf.ru/project/21-17-00049>

Список литературы:

1. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, – 1962. – 710 с.
2. Леонтьев И.О. Прибрежная динамика: волны, течения, потоки наносов. М.: ГЕОС, – 2001. – 272 с.
3. Пинегина Т.К. Пространственно-временное распределение очагов цунамигенных землетрясений тихоокеанского и берингоморского побережий Камчатки по отложениям палеоцунами: Автореферат докт. дис. Москва, – 2014. – 43 с.
4. Пинегина Т. К., Разжигаева Н. Г., Дегтерев А. В., Хомчановский А. Л. По следам голоценовых сильных землетрясений острова Итуруп // Природа. – 2023. – № 3(1291). – С. 51-57. DOI 10.7868/S0032874X23030055. EDN EWKIXV.
5. Хомчановский А.Л. Развитие береговых процессов при повышении уровня водоема (на примере озера Байкал) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – № 1 (41). – С. 99-107.
6. Aedo D. et al. Decadal coastal evolution spanning the 2010 Maule earthquake at Isla Santa Maria, Chile: Framing Darwin’s accounts of uplift over a seismic cycle // Earth Surface Processes and Landforms, 1-15.
7. Atwater B.F. et al. Summary of coastal geologic evidence for past great earthquakes at the Cascadia subduction zone// Earthquake Spectra, – 1995. – V. 11. – № 1. – P. 1-18.
8. Bruun P. The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usage // Journal of Coastal Research, – 1988. – V. 4. – № 4. – P. 627–648.
9. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bulletin of the seismological society of America. – 1985. – T. 75. – №. 4. – С. 1135-1154.
10. Pinegina T.K., Bourgeois J., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Krasheninnikov S.P., Portnyagin M.V. Coseismic coastal subsidence associated with unusually wide rupture of prehistoric earthquakes on the Kamchatka subduction zone: A record in buried erosional scarps and tsunami deposits // Quaternary Science Reviews. – 2020. – V. 233, – 106171.
11. Satake K., Nanayama F., Yamaki S. Fault models of unusual tsunami in the 17th century along the Kuril trench // Earth, planets and space. – 2008. – T. 60. – С. 925-935.

УДК 550.834:550.838.2:551.214.6(571.645)

Рубрика 38.19.19

ПОДВОДНЫЕ ВУЛКАНЫ ВБЛИЗИ ОСТРОВА СИМУШИР (КУРИЛЬСКАЯ
ОСТРОВНАЯ ДУГА)

UNDERWATER VOLCANOES NEAR SIMUSHIR ISLAND (KURIL ISLAND ARC)

Блох Юрий Исаевич¹, Бондаренко Вячеслав Иларионович², Долгаль Александр Сергеевич³, Новикова Полина Николаевна³, Петрова Вера Валерьевна⁴, Пилипенко Ольга Валентиновна⁵, Рашидов Владимир Александрович⁶, Трусов Алексей Андреевич⁷

¹ Москва

² КГУ, Кострома

³ ГИ УрО РАН, Пермь

⁴ ГИ РАН, Москва

⁵ ИФЗ РАН, Москва

⁶ ИВиС ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

⁷ АО «ГНПП Аэрогеофизика», Москва

Blokh Yuri Isaevich¹, Bondarenko Vyacheslav Ilarionovich², Dolgal Alexander Sergeevich³, Novikova Polina Nikolaevna³, Petrova Vera Valerievna⁴, Pilipenko Olga Valentinovna⁵, Rashidov Vladimir Alexandrovich⁶, Trusov Alexey Andreevich⁷

¹ Moscow

² IViS FEB, RAS Petropavlovsk-Kamchatsky

³ KSU, Kostroma

⁴ MI UB, RAS, Perm

⁵ GI RAS Moscow

⁶ IPE, RAS, Moscow

⁷ AO GNPP «Aerogeofizika», Moscow

Единственной островной дугой в Российской Федерации является Курильской островная дуга. В ее пределах при современном уровне изученности выделено 126 подводных вулканов.

Вблизи о. Симушир находятся семь подводных вулканов, входящих в состав Симуширской зоны, и подводный вулканический центр, расположенный у юго-западной оконечности острова [Блох и др., 2014а, 2014б; Бондаренко, Рашидов, 2011; Подводный..., 1992].

В результате многолетних планомерных комплексных геолого-геофизических исследований установлено, что вершины этих подводных вулканов расположены в глубинном интервале

1850 ÷ 129 м, а их относительные высоты изменяются от 350 м до 2100 м. Объем вулканических построек изменяется в диапазоне от 9 до 250 км³ (таблица).

При исследовании подводного вулкана Юбилейный установлено наличие двух вершин – северо-восточной и юго-западной, расположенных, соответственно, на глубинах 420 м и 700 м, а на склонах в интервале глубин 2500–1100 м – 7 побочных лавовых конусов. Необходимо отметить, что побочные конусы не характерны для подводных вулканов, расположенных в пределах Курильской островной дуги.

У восточного склона плоской вершины подводного вулканического центра 6.13 найдены небольшие одноактные вулканы, а на его склонах – цунамиопасные оползневые тела.

Параметры подводных вулканов

Название	Синоним	Широта, градусы	Долгота, градусы	Глубин над вершиной, м	Относительная высота, м	Объем, км ³
П.в. 5.1	Юбилейный	47.600	152.200	-420	2900	250
П.в. 5.2		47.460	152.166	-1300	900	40
П.в. 5.3		47.450	151.916	-850	2000	65
П.в. 5.4	Пегас	47.416	152.016	-500	2100	45
П.в. 5.5		47.350	152.080	-900	600	9
П.в. 5.6	Лисянского	47.250	152.166	-151	350	30
П.в. 5.7		47.450	152.150	-1850	700	7
П.в.ц. 6.13		46.280	150.260	-92	1400	80

Примечание: П.в. – подводный вулкан; П.в.ц. – подводный вулканический центр. Номера подводных вулканов согласно [Подводный вулканизм, 1992].

По данным сейсмоакустического профилирования установлено, что мощность осадков, покрывающих склоны и основания вулканов, расположенных вблизи о. Симушир, изменяется от 200 м до 600 м (рис. 1).

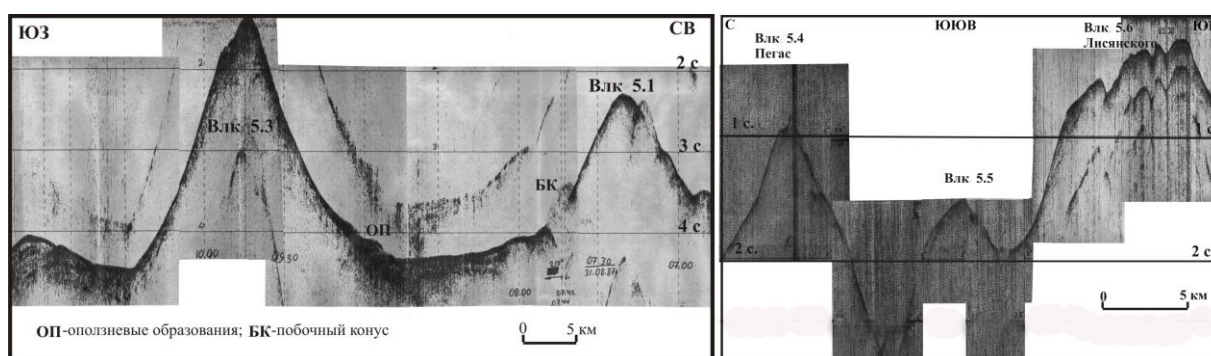


Рис. 1. Фрагменты профилей непрерывного сейсмоакустического профилирования. Цифрами обозначены номера подводных вулканов согласно [Подводный ..., 1992].

Все рассмотренные подводные вулканы преимущественно сложены базальтами, андезибазальтами и андезитами, на некоторых из них обнаружены железомарганцевые образования. На подводных вулканах Юбилейный и Лисянского найдены отчетливые минералогические признаки фумарольно-гидротермальной деятельности.

Подводе вулканы Симуширской зоны, за исключением вулкана 5.1, располагаются на древнем вулканическом основании дочетвертичного возраста и связаны с крупной зоной правосторонних сдвигов или сбросо-сдвигов.

Петромагнитные исследования показали, что естественная остаточная намагниченность горных пород, слагающих подводные вулканы Пегас и Лисянского, изменяется в диапазонах от 1.93 А/м до 7.76 А/м и от 1.66 А/м до 18.93 А/м, соответственно, а подводный вулканический центр 6.13 – от 1.86 А/м до 6.43 А/м. Фактор Кёнигсбергера пород вулканов Пегас, Лисянского и вулканического центра 6.13 всегда больше единицы, что говорит о том, что основной вклад в аномальное магнитное поле вносит естественная остаточная намагниченность. Основными носителями естественной остаточной намагниченности пород вулкана Пегас являются псевдооднородные и многодоменные зерна титаномагнетита, вулкана Лисянского – псевдооднородные зерна титаномагнетита, а вулкана 6.13 – псевдооднородные и многодоменные зерна титаномагнетит и магнетита.

Результаты геомагнитного моделирования показали, что векторы эффективной намагниченности **ЖэФ**, рассчитанные для подводного вулкана Лисянского и подводного вулканического центра 6.13, развернуты относительно вектора современного нормального магнитного поля Земли **T₀** (рис. 2). Это свидетельствует о приуроченности времени образования этих построек, как и других изученных подводных вулканов в пределах Курильской островной дуги [Блох и др., 2015], к периодам геомагнитных инверсий.

Подводные вулканы, расположенные вблизи о. Симушир, отчетливо проявляются в аномальном магнитном поле и к ним приурочены локальные аномалии ΔT_a интенсивность которых достигает 1800 нТл [Бабаянц и др., 2005, 2006; Блох и др., 2014а, 2014б, 2020, 2022].

В пределах изученных вулканических построек по данным интерпретации установлены магматические камеры, расположенные на глубинах 1–3.5 км, а также ряд подводных каналов.

В результате проведенного 3D геомагнитного моделирования выяснено, что наиболее магнитными являются вершинные части вулканических построек [Бабаянц и др., 2005, 2006; Блох и др., 2014а, 2014б, 2020, 2022]. Эффективная намагниченность подводных вулканов Юбилейного и Лисянского достигает, соответственно, 0.8 А/м и 3.8 А/м а вулканического центра 6.13 в интервале глубин 450–950 м – 3 А/м (рис. 3).

Результаты 3D геомагнитного моделирования хорошо согласуются с данными петромагнитных исследований.

Выполненная томографическая интерпретация данных гидромагнитной съемки, направленная на изучение глубинного строения подводных вулканов [Блох и др., 2014б, 2022], позволила выделить аномальные области, которые прослеживаются до эффективной глубины 1 км для подводного вулкана Лисянского и до эффективной глубины 14 км – для подводного вулканического центра 6.13 (рис. 4).

В результате комплексных геолого-геофизические исследований определены химический и минеральный составы, а также выполнена оценка магнитных свойств горных пород, слагающих подводные вулканические постройки, расположенные вблизи о. Симушир.

Сделан вывод о том, что основными носителями намагниченности являются однодоменные и псевдооднодоменные зерна титаномагнетита и магнетита.

Выделены отчетливые минералогические признаки фумарольно-гидротермальной деятельности в постройках подводных вулканов Юбилейный и Лисянского.

Установлена мощность пирокластических отложений, отложенных на склонах и у оснований подводных вулканических построек.

Установлено, что образование изученных построек происходило в период геомагнитных инверсий.

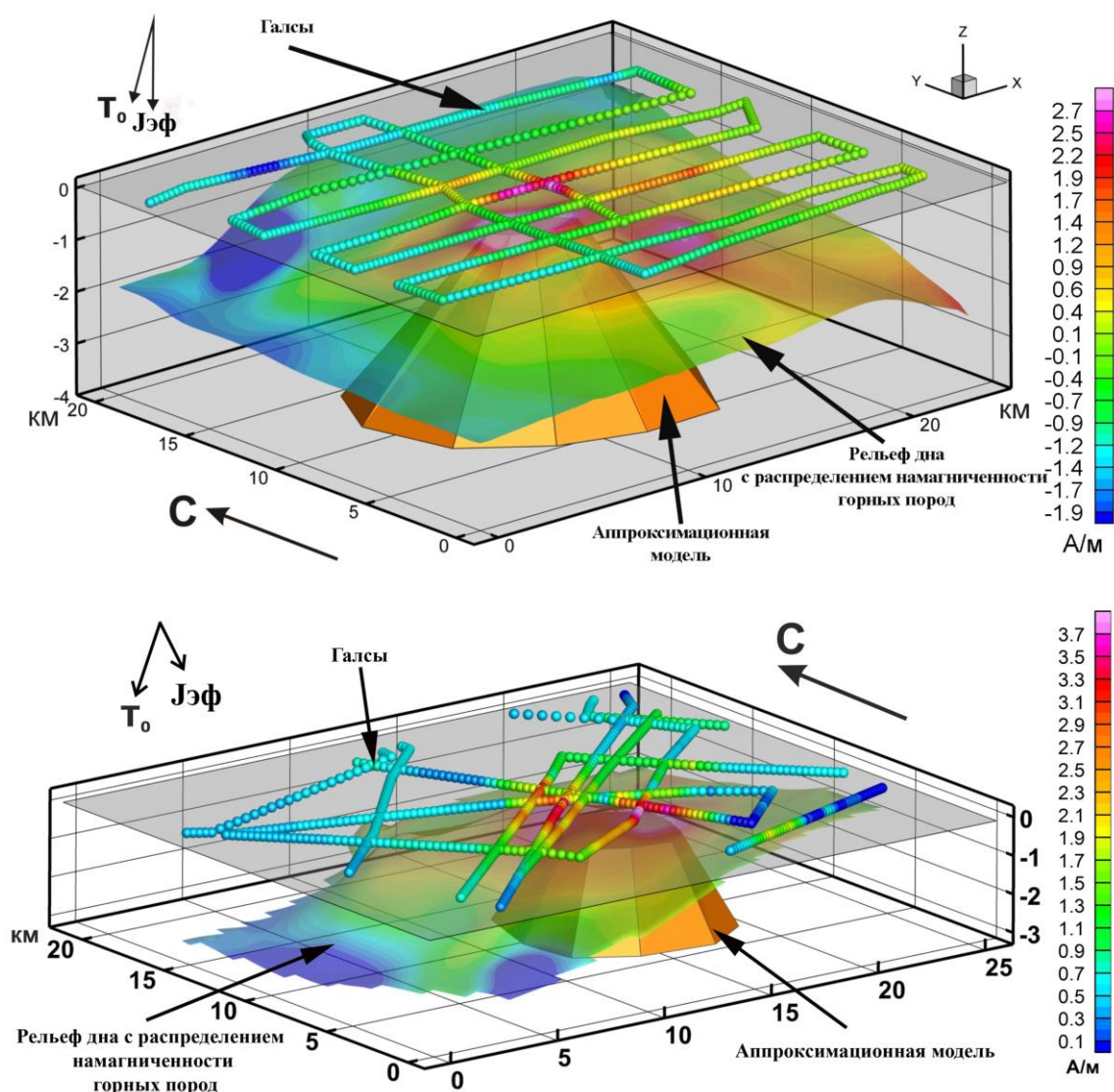


Рис. 2. Уточнение направления векторов эффективной намагниченности $\mathbf{J}_{\text{эф}}$ подводного вулканического центра 6.13 (вверху) и вулкана Лисянского (внизу).

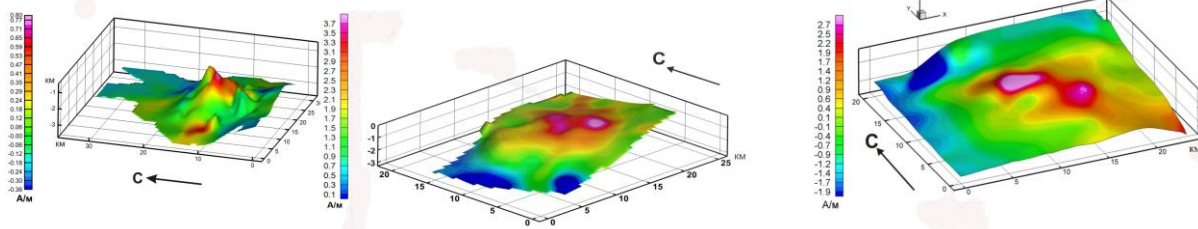


Рис. 3. 3D геомагнитные модели подводных вулканических структур подводных вулканов: Юбилейного (слева), Лисянского (в центре) и б.13 (справа).

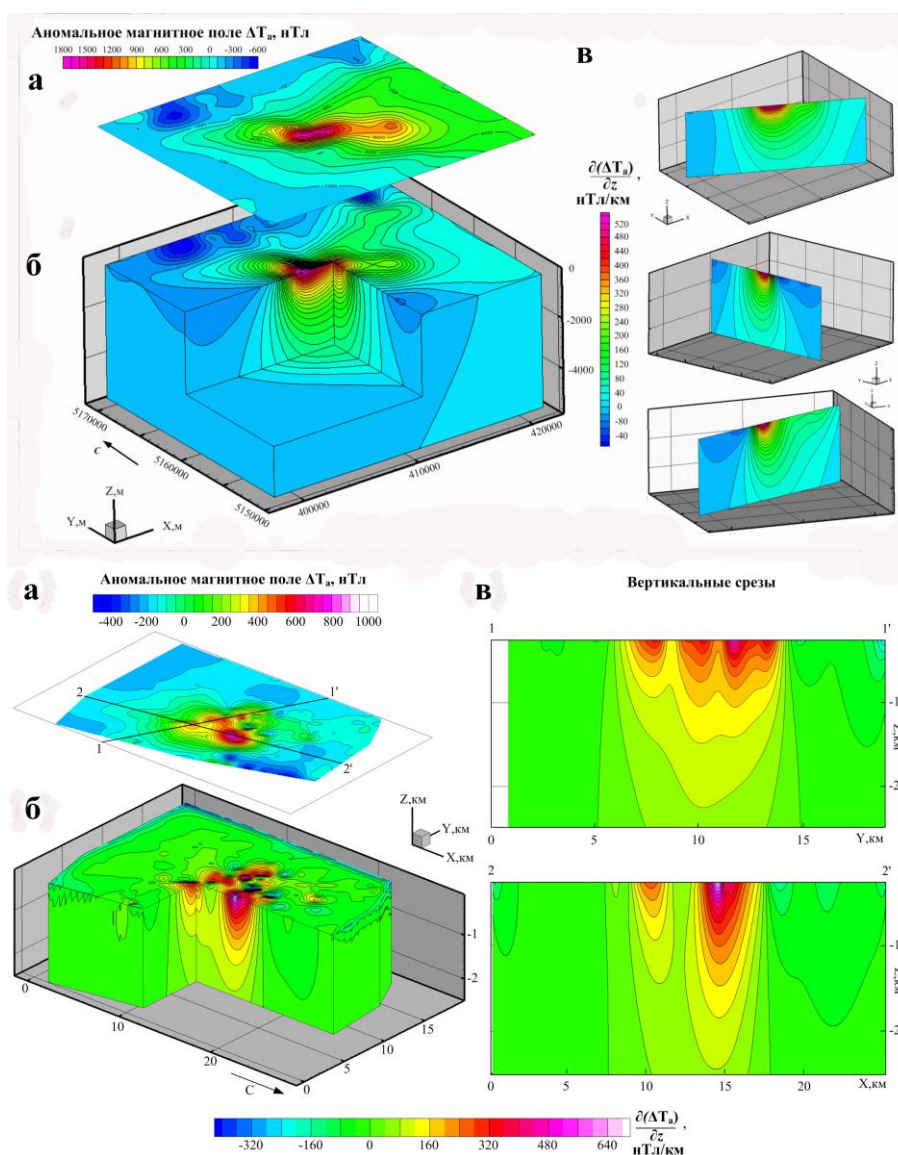


Рис. 4. Изолинии аномального магнитного поля ΔT_a (а), 3D-диаграмма (б), отражающая пространственное распределение квазинамагниченности горных пород, слагающих вулканические постройки и ее сечения (в). Подводный вулкан б. 13 (вверху) и подводный вулканический центр Лисянского (внизу).

Построены 3D петромагнитные модели для подводных вулканов Юбилейный и Лисянского, а также для подводного вулканического центра б.13.

С помощью современных компьютерных технологий в пределах некоторых вулканических построек выделены подводящие каналы и периферические магматические очаги.

Список литературы:

1. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Применение пакета программ структурной интерпретации СИГМА-3D при изучении подводных вулканов Курильской островной дуги // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2005. – № 2. Вып. 6. – С. 67–76.
2. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. 3D моделирование подводных вулканов Курильской островной дуги // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 33-ей сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. Екатеринбург, 30 января – 3 февраля 2006 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. – С. 16-21.
3. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Геофизические исследования подводного вулканического центра вблизи юго-западной оконечности о. Симушир (Курильская островная дуга) // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 41-й сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского, 27 января – 31 января 2014 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2014а. – С. 44–46.
4. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Применение современных компьютерных технологий для исследования подводного вулканического центра вблизи юго-западной оконечности о. Симушир (Курильская островная дуга) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2014б. – № 2. – Вып. 24. – С. 27–40.
5. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Комплексные исследования подводного вулкана Лисянского (Курильская островная дуга) // Материалы XXIII Региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 2020 г. / Главный редактор: д.г.-м.н. А.Ю. Озеров. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. – С. 91–94.
6. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Новикова П.Н., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Комплексные геолого-геофизические исследования подводного вулкана Лисянского (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. – 2022. – № 6. – С. 27–41. <https://doi.org/10.31857/S0203030622050030>
7. Блох Ю.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Оценка остаточной намагниченности подводных вулканов Курильской островной дуги с применением программы ИГЛА // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 2, Вып. № 26. – С. 5–10.
8. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводные вулканы Центральных Курил // Вулканизм и геодинамика. Материалы V Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. 21–25 ноября 2011 года, г. Екатеринбург. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. – С. 404–406.
9. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука. – 1992. – 528 с.

УДК 551.352

Рубрика 38.15.00

ОСАДОЧНОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ ТРАНСФОРМНОЙ ЗОНЫ ЧАРЛИ-ГИББС
 SEDIMENT INFILL OF THE CHARLIE-GIBBS FRACTURE ZONE

**Дорохова Евгения Валерьевна^{1,2}, Пономаренко Екатерина Петровна¹, Пугачева
 Татьяна Леонидовна^{1,2}, Баширова Лейла Джангировна^{1,2}, Соколов Сергей Юрьевич³**

¹ *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Москва*

² *Балтийский федеральный университет им. И. Канта (БФУ им. Канта), Калининград*

³ *Геологический институт РАН (ГИН РАН), Москва*

**Dorokhova Evgenia Valerievna^{1,2}, Ponomarenko Ekaterina Petrovna¹, Pugacheva Tatiana
 Leonidovna^{1,2}, Bashirova Leyla Dzhangirovna^{1,2}, Sokolov Sergey Yurievich³**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

³ *Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Введение

Морские трансформные разломы занимают обширные площади океанского дна и являются границами литосферных плит, образованными сдвиговыми разломами. Морфологически они резко отличаются от окружающих глубоководных равнин и срединно-океанических хребтов, поскольку представляют собой узкие вытянутые впадины с крутыми склонами. Благодаря своей форме они могут служить глубоководными проходами для придонных водных масс и способствовать обмену водой, отложениями и биотой между соседними абиссальными равнинами (Hernández-Molina *et al.* 2008).

Зона разломов Чарли-Гиббс (ЧГ) является основной трансформной системой в Северной Атлантике и относится к "мегатрансформам", поскольку состоит из двух трансформных долин (Сколотнев и др., 2021). Она характеризуется значительным смещением рифтовых сегментов Срединно-Атлантического хребта на 340 км и высокой протяженностью разломов за пределами активной зоны, что делает ее уникальной структурой в северных широтах Атлантического океана. Разлом ЧГ образован северной и южной разломными долинами, разделенными межразломным хребтом (Рисунок 1). Трансформные долины разделяются спрединговым центром в хребте на активные и пассивные части. Активные трансформы расположены в западной и восточной секциях северной и южной долин, соответственно.

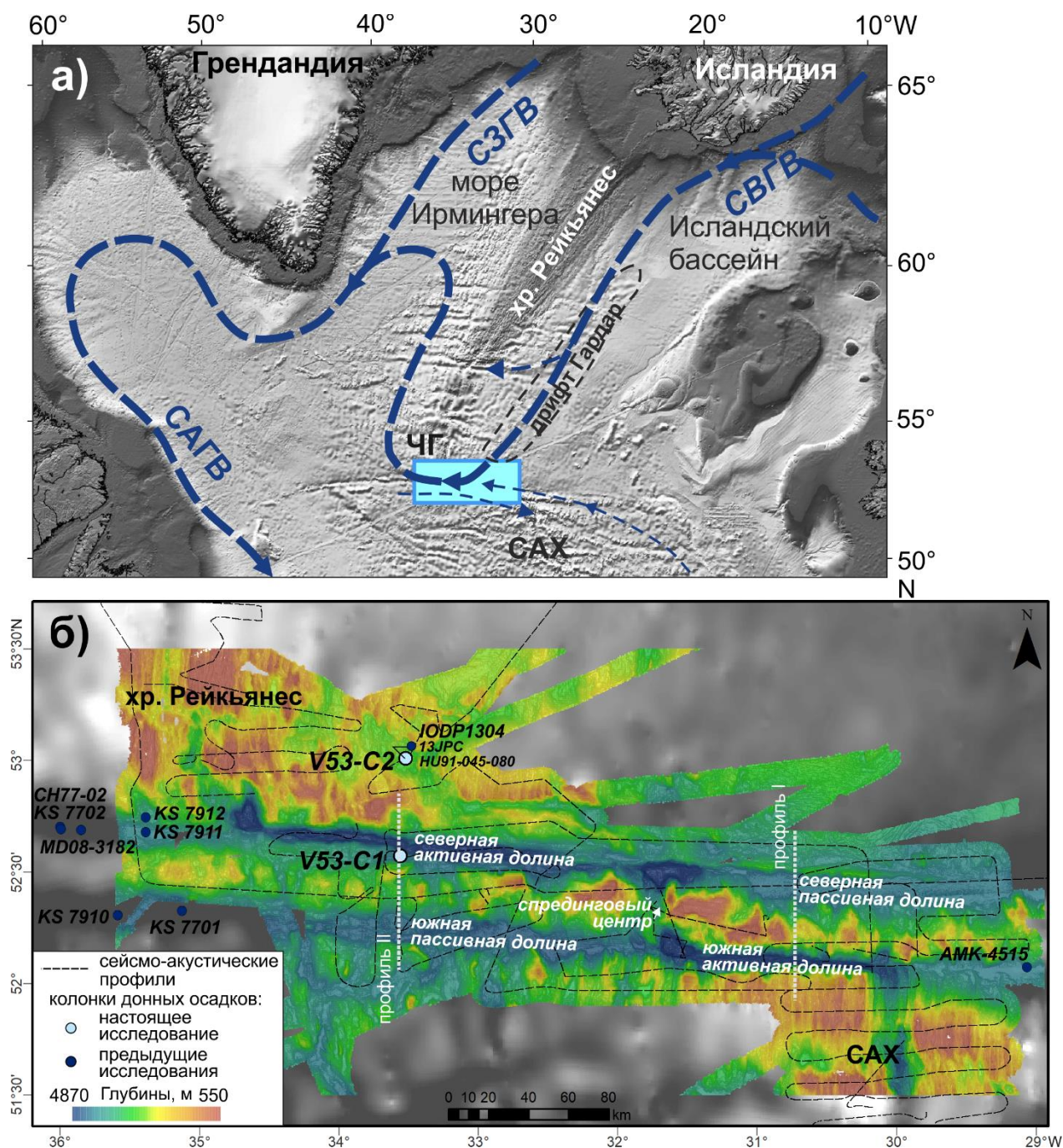


Рисунок 1. Район исследования: а) схема придонных течений в Северо-Восточной Атлантике по (Daniault *et al.* 2016), голубой прямоугольник обозначает район исследования, представленный на схеме б, СВГВ – Северо-восточная глубинная вода, СЗГВ – Северо-западная глубинная вода, САГВ – Северо-Атлантическая глубинная вода, ЧГ – зона трансформных разломов Чарли-Гиббс, САХ – Срединно-Атлантический хребет; б) батиметрическая схема зоны трансформных разломов Чарли-Гиббс (Сколотнев и др., 2021) и положение проанализированных сейсмо-акустических профилей и колонок донных осадков. Белый пунктир – положение разрезов, представленных на Рисунке 2.

ЧГ является основным глубоководным проходом для распространяющейся на запад Северо-восточной глубинной воды (СВГВ) (Рисунок 1). СВГВ входит в состав Северо-Атлантической глубинной воды, являющейся нижней ветвью Атлантической меридиональной

опрокидывающейся циркуляции, тесно связанной с глобальными изменениями климата в четвертичный период (Broecker *et al.* 1985). На пути своего распространения течение СВГВ оказывает значительное седиментологическое воздействие в Исландском бассейне, образуя гигантские осадочные тела - контуритовые дрефты, такие как Бьёрн и Гардар на восточном склоне хребта Рейкьянес (Bianchi and McCave 2000). Проходя через долины ЧГ, придонное течение может способствовать образованию аккумулятивных и эрозионных форм из-за увеличения скорости донного течения в узких депрессиях, как это происходит в других глубоководных проходах (например, (Glazkova *et al.* 2021; Borisov *et al.* 2023)). Осадки, сформированные под влиянием придонных течений (контуриты), служат ценным палеоокеанологическим архивом параметров палеотечений (например, McCave *et al.* 2017). Реконструкция осадочных процессов необходима для выявления и изучения климатического сигнала в отложениях.

Геологическое строение и гидрологический режим в районе ЧГ достаточно хорошо исследованы, однако процессы осадконакопления остаются слабоизученными. Целью работы является реконструкция процессов осадконакопления в зоне ЧГ в период позднего плейстоцена – голоцена на основе сейсмоакустических данных высокого разрешения и литологических исследований колонок донных отложений.

Материалы и методы

Материалы включают данные сейсмоакустического профилирования дна с высоким разрешением, полученные в 50-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» в 2020 году с помощью акустической системы EdgeTech 3300 (2-6 кГц) (Сколотнев и др., 2021). В 53-м рейсе ПС «Академик Сергей Вавилов» отобраны две колонки донных отложений V53-C1 (52°37,080' с.ш., 33°34,726' з.д., глубина отбора 3850 м, длина 4,65 м) и V53-C2 (53°03,301' с.ш., 33°32,719' з.д., глубина отбора 3140 м, длина 5,20 м) (Skolotnev *et al.* 2023). В качестве батиметрической основы использована полученная ранее цифровая модель рельефа дна (Сколотнев и др., 2021).

На основе сейсмоакустических данных выполнена классификация эхо-типов в районе исследования. Для колонок донных осадков выполнены комплексные литологические исследования, включающие литологическое описание, геохимический анализ рентгено-флуоресцентным методом портативным анализатором Olympus Vanta C, анализ содержания карбоната кальция на углеродном анализаторе AN-7529M, гранулометрический анализ на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SALD 2300 (Shimadzu), определение минерального состава на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS), анализ магнитной восприимчивости с использованием системы Bartington MS3 со сканирующим датчиком MS2E.

В колонках донных осадков проведен микропалеонтологический анализ и подсчет зерен ледового разноса для фракции осадка крупнее 100 мкм. Зерна вулканического стекла подсчитывались отдельно от зерен кварца. Кроме того, был определен процент холодноводного вида *Neogloboquadrina pachyderma* (sin.) относительно числа остальных раковин планктонных фораминифер.

Датирование трех образцов методом радиометрической ускорительной масс-спектрометрии по ¹⁴C выполнено в “AMS Golden Valley” (Центр коллективного использования научного оборудования "Ускорительная масс-спектрометрия" Новосибирского государственного университета и Новосибирского научного центра, Новосибирск, Россия). Возраст ¹⁴C откалиброван с использованием программного обеспечения Calib 8.20 и калибровочной кривой MARINE20 (Heaton *et al.* 2020) с учетом резервуарного возраста 550 лет.

Литостратиграфическое подразделение колонок проведено на основе распределения концентраций CaCO_3 , $\ln(\text{Ca}/\text{Fe})$ и холодноводного вида *N. pachyderma* (sin.). Дополнительно была выполнена корреляция минералогических данных с минеральным составом датированной колонки HU91-045-080 (Fagel and Mattielli 2011), отобранной на месте керна глубоководного бурения IODP 1304 на расстоянии 1 км от колонки V53-C2. Литостратиграфическое подразделение заверено датировками AMS ^{14}C .

Результаты

На основе данных высокоразрешающего профилирования дна в районе исследования выделено 13 эхо-типов. В северной пассивной долине ЧГ распространены эхо-типы с четкой акустической стратификацией и пологой ундуляцией рефлекторов. Поверхность дна осложнена осадочными волнами. В северном активном трансформе дно депрессии, вытянутой вдоль северного склона, характеризуется эхо-типами с хаотичным акустическим сигналом, что свидетельствует о преобладании турбидитов. Осадочное тело на террасе, примыкающей к южному склону долины, имеет характерную клиновидную форму и представлено стратифицированными ундуляционными эхо-типами. Дно южной активной долины характеризуется рассеянным акустическим сигналом, указывающим на отсутствие неконсолидированных осадков. В южной пассивной долине выявлены линзовидные аккумулятивные тела. Эти отложения, а также вершины и пологие склоны срединных хребтов представлены акустически стратифицированными эхо-типами. Эхо-типы с хаотичными рефлекторами широко распространены у подножий склонов долин и срединных хребтов во всех долинах разлома, что свидетельствует о наличии турбидитов. Севернее разлома, в изолированной впадине на восточном склоне хребта Рейкьянес выявлены акустически стратифицированное аккумулятивное тело и прилегающий к нему эрозионный канал, интерпретированные как контуритовые дрифт и канал.

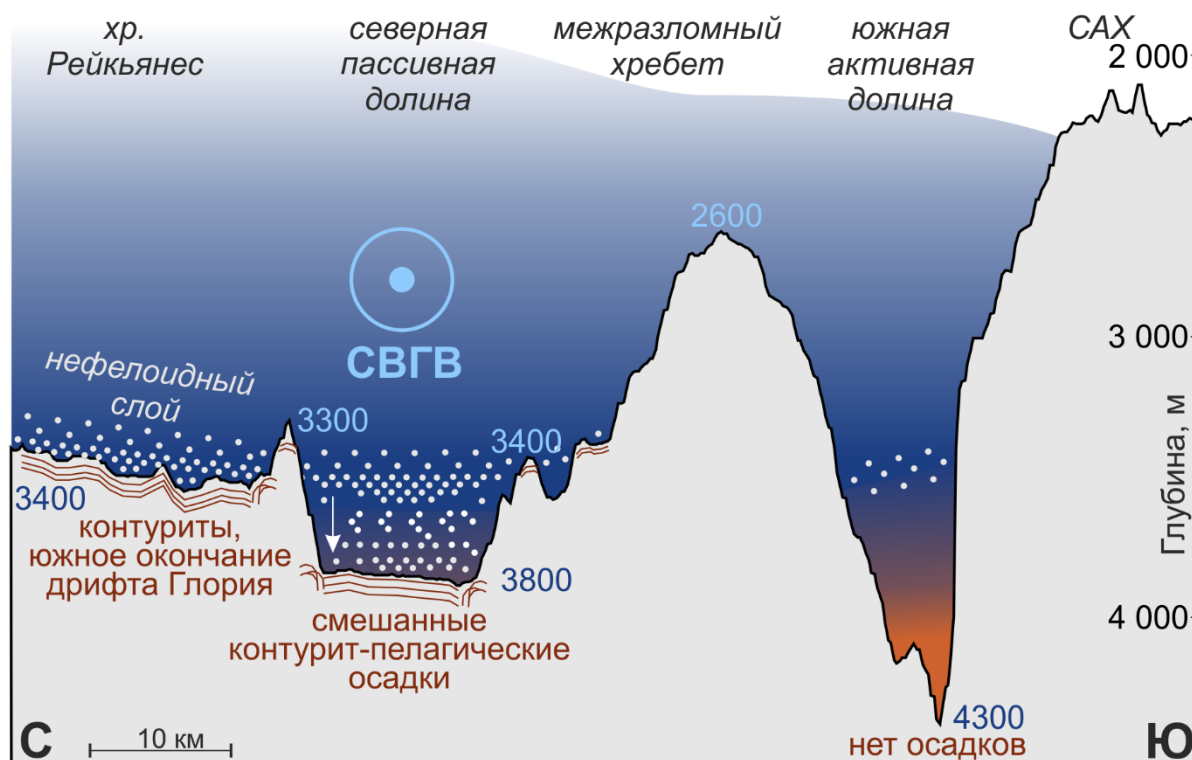
Согласно литостратиграфическому подразделению и полученным датировкам осадки двух исследованных колонок имеют позднечетвертичный возраст. Проведенные анализы позволили выделить шесть литофаций. Литофации F1 и F2 являются общими для двух колонок. Фация F1 относится к голоценовому периоду и интерпретирована как смешанная контурит-пелагическая. Фация F2 представлена гемипелагитами с высоким содержанием зерен ледового разноса и относится к позднему плейстоцену. В колонке V53-C1, отобранной на вершине аккумулятивного тела на террасе северной активной долины, в позднеплейстоценовых осадках выявлены литофации F3 и F4, интерпретированные как высококарбонатная гемипелагическая фация с высоким содержанием зерен ледового разноса и турбидит, соответственно. Колонка V53-C2, полученная в вершине контуритового дрифта в изолированной впадине хребта Рейкьянес, характеризуется двумя специфическими литофациями F5 и F6, интерпретированными как диатомовый мат и пепловый прослой, соответственно. Интервал пеплового прослоя (F6) соотнесен с пепловым слоем зоны 1 Северной Атлантики по аналогии с пепловым горизонтом, соответствующим позднему дриасу в соседней колонке JPC-13 (Hodell *et al.* 2010), что позволило получить дополнительную временную привязку.

Формирование осадочной толщи в ЧГ

Анализ имеющихся материалов позволил реконструировать механизмы формирования осадочной толщи ЧГ в позднечетвертичный период. В течение теплого голоценового интервала отложения в долинах разлома накапливались под влиянием течения СВГВ, причем ее наибольшее влияние выявлено в северной долине и в изолированной впадине на восточном склоне хребта Рейкьянес (Рисунок 2). Поскольку дно северной пассивной долины с глубинами

3800-3900 м находится глубже, чем нижняя граница современной СВГВ (~3500 м, (Bower and Furey 2017)), предположено, что придонное течение непосредственно не взаимодействует с отложениями, что приводит к смешанному контурит-пелагическому типу осадконакопления. Контуритовый компонент обусловлен взвешенным веществом, переносимым внутри нефелоидного слоя придонного течения СВГВ. Вертикальное осаждение из нефелоидного слоя способствует формированию акустически слоистой осадочной толщи. Широко распространенные осадочные волны указывают на увеличение гидродинамической активности в долинах из-за увеличения скорости придонных течений в ограниченном пространстве.

а) восточный профиль I



б) западный профиль II

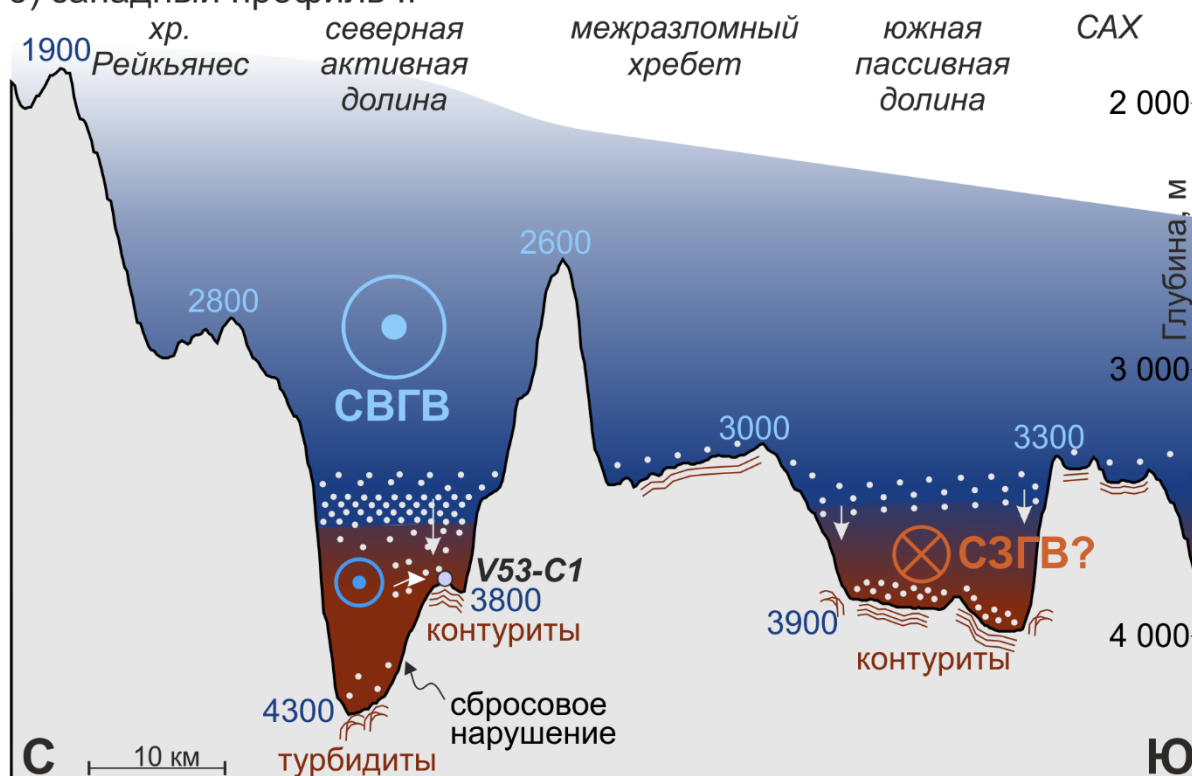


Рисунок 2. Схема процессов осадконакопления в ЧГ в современный (голоценовый) период. Сокращения расшифрованы на Рисунке 1. Синие цифры – глубины дна на ключевых геоморфологических точках.

В активной части северной долины тектонические процессы определяют положение эрозионного канала вдоль северного склона долины, тогда как на террасе вдоль южного склона развивается тектонически контролируемый контуритовый дрейф под влиянием течения СВГВ. Формирование контуритовых дрейфов на террасе на глубине практически нулевых значений скорости СВГВ по данным (Bower and Furey 2017) можно объяснить локальным увеличением скорости придонного течения при прохождении узкой вытянутой впадины активного разлома. Увеличение скорости потока топографически обусловлено сужением впадины согласно закону Бернулли (Whitehead 1998) и может оказывать значительное влияние на латеральный перенос взвеси и формирование контуритовых дрейфов (Rebesco *et al.* 2014).

В западной (пассивной) части южной долины образование русловых контурных дрейфов, вероятно, обусловлено течением Северо-западной глубинной воды, подстилающей СВГВ и распространяющейся в восточном направлении.

Смешанный контурит-пелагический и контуритовый типы осадконакопления в голоцене способствовали формированию отложений с высокими скоростями осадконакопления (в среднем 19-24 см/тыс. лет), которые позволяют проводить палеоокеанологические реконструкции с высоким разрешением. На основе данных минералогического анализа выявлено постепенное исчезновение амфибола из осадков колонки V53-C2 с нижней части колонки до горизонтов раннего голоцена и до среднего голоцена в более южной колонке V53-C1. Это указывает на последовательное уменьшение поступления амфибола из Северо-Западной Атлантики из-за возрастающего влияния направленного на запад течения СВГВ в период раннего-среднего голоцена.

Во время ледникового периода позднего плейстоцена в обеих долинах преобладало гемипелагическое осадконакопление. Сопоставление осадочных разрезов колонок с сейсмоакустическими данными показало, что осадки с высоким содержанием материала ледового разноса совпадают с интенсивными акустическими рефлекторами. Таким образом, акустически слоистая структура отложений, заполняющих трансформные долины, обусловлена чередованием ледниковых и межледниковых интервалов, по крайней мере в верхней части осадочной толщи.

Тектонические деформации, нарушающие акустическую слоистую структуру осадочных толщ, были обнаружены в ЧГ как в пределах активных трансформных разломов, так и в долинах пассивных разломов и за пределами зоны разломов. Они представлены штамповыми складками, взбросовыми и сбросовыми нарушениями, а также структурами протыкания, в основном связанными с современной тектонической активностью, носящей, вероятно, сдвиговый характер.

Выводы

На основе данных высокоразрешающего профилирования дна, а также комплексного анализа осадочных разрезов реконструированы условия формирования осадочной толщи ЧГ в позднечетвертичный период. В позднем плейстоцене в обеих долинах мегатрансформа ЧГ преобладало гемипелагическое осадконакопление. В голоцене выявлены смешанный контурит-пелагический и контуритовый типы накопления материала, способствующие высоким скоростям осадконакопления. В данный период в северной долине и во впадине на восточном склоне хребта Рейкьянес осадки накапливались под влиянием течения СВГВ. Результаты минералогического анализа указывают на постепенное усиление интенсивности течения СВГВ, начиная с раннего-среднего голоцена. Контуритовые дрейфы в южной пассивной долине, вероятно, образовались под действием СВГВ. В акустически слоистой структуре отложений, обусловленной чередованием ледниковых и межледниковых интервалов, выявлены деформации, обусловленные современной тектонической активностью.

Исследование подчеркивает важность зон океанических трансформных разломов для палеореконокструкций, поскольку они могут служить глубоководными проходами для придонных течений, которые оставляют заметный седиментологический след при прохождении через такие проходы. Его расшифровка способствует реконструкции параметров палеотечений, что позволяет получить важную информацию для изучения климата прошлого.

Благодарность

Авторы благодарят Ласкину Дарью Николаевну за выполнение гранулометрического анализа и Добролюбову Ксению Олеговну за составление батиметрической схемы.

Финансирование

Исследование колонок донных осадков выполнено при поддержке РФФИ, проект № 22-17-00170, <https://rscf.ru/project/22-17-00170/>. Интерпретация сейсмоакустических профилей выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2021-0012).

Список литературы:

1. Сколотнев, С.Г., Санфилиппо, А., Пейве А.А. и др. 2021. Геолого-геофизические исследования разломной зоны Чарли Гиббс (Северная Атлантика). *Доклады Российской Академии Наук. Науки О Земле*, 497, 5–9.
2. Bianchi, G.G. and McCave, I.N. 2000. Hydrography and sedimentation under the deep western boundary current on Bjorn and Gardar Drifts, Iceland Basin. *Marine Geology*, 165, 137–169.
3. Borisov, D.G., Frey, D.I., Ivanova, E. V., Dmitrevskiy, N.N., Levchenko, O. V., Fomin, V. V. and Ligi, M. 2023. Unveiling the contourite depositional system in the Vema Fracture Zone (Central Atlantic). *Scientific Reports*, 13, 1–12.
4. Bower, A. and Furey, H. 2017. Iceland-Scotland Overflow Water transport variability through the Charlie-Gibbs Fracture Zone and the impact of the North Atlantic Current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122, 6989–7012.
5. Broecker, W.S., Peteet, D.M. and Rind, D. 1985. Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? *Nature*, 315, 21–26.
6. Daniault, N., Mercier, H., et al. 2016. The northern North Atlantic Ocean mean circulation in the early 21st century. *Progress in Oceanography*, 146, 142–158.
7. Fagel, N. and Mattielli, N. 2011. Holocene evolution of deep circulation in the northern North Atlantic traced by Sm, Nd and Pb isotopes and bulk sediment mineralogy. *Paleoceanography*, 26, 1–15.
8. Glazkova, T., Hernández-Molina, F.J., et al. 2021. Sedimentary processes in the Discovery Gap (Central–NE Atlantic): An example of a deep marine gateway. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 180, 103681.
9. Heaton, T.J., Köhler, P., et al. 2020. Marine20 - The Marine Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon*, 62, 779–820.
10. Hernández-Molina, F.J., Maldonado, A. and Stow, D.A.V. 2008. Chapter 18 Abyssal Plain Contourites. *Developments in Sedimentology*, 60.

11. Hodell, D.A., Evans, H.F., Channell, J.E.T. and Curtis, J.H. 2010. Phase relationships of North Atlantic ice-rafted debris and surface-deep climate proxies during the last glacial period. *Quaternary Science Reviews*, 29, 3875–3886.
12. McCave, I.N., Thornalley, D.J.R. and Hall, I.R. 2017. Relation of sortable silt grain-size to deep-sea current speeds: Calibration of the ‘Mud Current Meter’. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 127, 1–12.
13. Rebesco, M., Hernández-Molina, F.J., Van Rooij, D. and Wåhlin, A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations. *Marine Geology*, 352, 111–154.
14. Skolotnev, S.G., Sanfilippo, A., et al. 2023. Crustal Accretion Along the Northern Mid Atlantic Ridge (52°-57°N): Preliminary Results From Expedition V53 of R/V Akademik Sergey Vavilov. *Ofioliti*, 48, 13–30.
15. Whitehead, J.A. 1998. Topographic control of oceanic flows in deep passages and straits. *Reviews of Geophysics*, 36, 423–440.

УДК 551.462.6

Рубрика 38.17.27

РАЗНООБРАЗИЕ СТРОЕНИЯ И РАЗРУШЕНИЕ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОСТРОЕК В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИКИ.

DIVERSITY OF STRUCTURE AND DESTRUCTION OF VOLCANIC EDIFICES IN THE NORTHEASTERN PART OF THE ATLANTIC.

Мазарович Александр Олегович

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Геологический институт Российской академии наук, Москва*

Mazarovich Alexander Olegovich

Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

В пределах северо-восточной части Атлантики расположены (с юга на север) архипелаги вулканических островов Зеленого Мыса, Канарский, Селваженш, Мадейра и Азорский. Помимо островных сооружений, в этой части Атлантического океана расположены многочисленные подводные горы, которые сосредоточены в пределах следующих вулканических провинций: Островов Зеленого Мыса, Канарской, Атлантик-Грейт-Метеор и Азорской. Существуют также отдельные подводные горы вне указанных регионов.

Проведенный анализ показывает, что вулканические подводные горы в северо-восточной части Атлантического океана, отличаются по рельефу и были образованы в результате извержений подводных вулканов центрального типа, трещинных систем или их комбинаций. Все перечисленные типы подводных вулканических сооружений имеют аналоги и на островах (рис. 1).

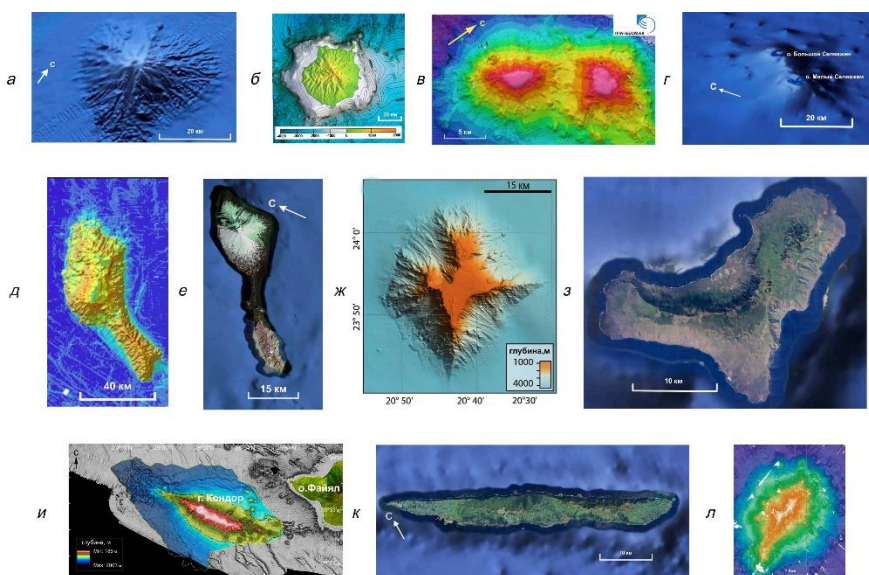


Рис.1. Сходство строения вулканических подводных гор и островов. а, в, д, ж, и, л – подводные горы: а – Кабо Верде [1], в – Нола [2], д – Те Папс [3], ж – Тропик [4], и – Кондор

[5], л – Вестерис [6]; б,г,е,з,к – острова: б – Гран Канария [7], г – Салвеженш [1], е – Ян-Майен [1], з – Иерро [1], к – Сан-Жоржи [1]

Наиболее простая форма подводных гор представляет собой конусоподобное сооружение с одной вершиной («моновулкан») (рис. 1). Подобные объекты широко развиты, в восточной части Зеленомысской провинции (например, горы Маю и Кабо Верде). В случае активного поступления магматического материала, неотектонических движений или изменения уровня моря горы могут подняться выше уровня моря и образовать острова типа Фогу, Гран-Канария (рис. 1) или Гомера.

Такие постройки могут разрушаться катастрофическими оползнями. Разрушение более крутого восточного склона постройки Фогу произошло ~ 70 тыс. лет назад [8]. В результате был сформирован оползневой цирк диаметром около 8 км, на восточном крае которой расположен вулканический конус Пику де Фогу с высотой вершины 2829 м над уровнем моря. Он начал формироваться ~ 62 тыс. лет назад, с последующим заполнением цирка лавами щелочных базальтов, которое продолжается до настоящего времени. Разрушение вулкана привело [9] к формированию крупных оползневых масс и образованию цунамигенных отложений на о-вах Сантьягу и Маю (расстояние 50 и 120 км соответственно) в результате цунами с высотой порядка 170 м.

Более сложный тип подводных гор представлен двумя сближенными вулканическими постройками («двухвершинная гора»). Такой тип объектов может представлять г. Нола (рис). В случае их поднятия над уровнем моря может сформироваться архипелаг островов типа о-вов Селвеженш [10] (рис. 1).

Вулканические сооружения могут быть образованы также в результате деятельности как подводного вулкана центрального типа, так и трещинной системы («комбинированные горы»). Такой тип объектов может представлять г. Те-Папс [3] (рис. 1). Похожие горы (г. Варвик) известны [11] и в Аляскинском заливе (Тихий океан). В случае поднятия указанного типа подводных гор над уровнем моря могут формируются острова, похожие на о. Ян-Майен (рис. 1) [12].

Более сложной морфологией обладают постройки, имеющие в плане «звездоподобную» форму (например, о-ва Иерро (рис.1), Генерифе, г. Тропик (рис.1). Они возникали в результате деятельности подводного вулкана центрального типа, который сочетался с активностью 3-4 радиальных трещинных вулканических систем. Трещинное происхождение «лучей» устанавливается, с большой степенью вероятности, при их сравнении с рифтовыми зонами островов Иерро [13] и Генерифе, на которых сходные объекты представлены рядами даек и многочисленными шлаковыми конусами. «Лучи» создавали благоприятные условия для формирования оползневых процессов между ними.

Вулканические сооружения в северо-восточной Атлантике могли формироваться также преимущественно при трещинных извержениях. Они, по своей морфологии представляют собой хребты, протяженностью в десятки км с хорошо выраженной приподнятой частью. Острова группы Десерташ (архипелаг Мадейра) [14] представляют собой остатки островной вулканической рифтовой зоны, сложенной сериями лавовых потоков, шлаковыми конусами, часто наложенных друг на друга, которые прорваны рядами крутопадающих даек. Вдоль них расположены стенки отрывов оползней и обломочных потоков, перемещенных на 20 и 45 км соответственно. Подводная гора Кондор [5] (рис) также может быть примером таких объектов.

Трещинные подводные извержения также могли приводить к формированию вытянутых форм подводного рельефа не имеющих четко выраженной вершины. К ним можно отнести горы эллипсоидного в плане очертания – Кадамосто, Тавареш, а также, за пределами региона, гора Вестерис, расположенная восточнее о. Гренландия [6].

Все вышеописанные типы гор, при их подъеме выше уровня моря, формируют острова, которые подвергаются волновой абразии, что приводит к созданию субгоризонтальных поверхностей при их погружении (гайоты). Они известны во всех вулканических провинциях: Островов Зеленого Мыса (г. Нола, Сенгор), Канарской (г. Тропик), Метеор (г. Атлантик, Круизер, Тайро, Грейт Метеор, Йер).

Список литературы:

1. <https://earth.google.com>
2. <https://www.ldf.uni-hamburg.de/en/meteor/wochenberichte/expeditionenarchiv-meteor.html>
3. Palomino D., Vázquez J.-T., Somoza L., León R. et al. Geomorphological features in the southern Canary Island Volcanic Province: The importance of volcanic processes and massive slope instabilities associated with seamounts // *Geomorphology*. – 2016. Vol. 255. – P. 125–139
4. Josso P., Parkinson I., Horstwood M. et al. Improving confidence in ferromanganese crust age models: A composite geochemical approach // *Chemical Geology*. – 2019. – Vol. 513. – P. 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.03.003>
5. Tempera F., Hipólito A., Madeira J. et al. Condor seamount (Azores, NE Atlantic): A morpho-tectonic interpretation // *Deep Sea Research. Part II. Topical Studies in Oceanography*. – 2013. – Vol. 98. – P. 24–37. DOI:10.1016/j.dsr2.2013.09.016
6. Unger Moreno K. A., Thal J. et al. Volcanic Structures and Magmatic Evolution of the Vesteris Seamount, Greenland Basin // *Front. Earth Sci., Sec. Volcanology*. – 2021. – Vol. 9. | <https://doi.org/10.3389/feart.2021.711910>
7. Funck T., Schmincke H.-U. Growth and destruction of Gran Canaria deduced from seismic reflection and bathymetric data // *J. Geoph. Res.* – 1998. – V. 103, No. B7. – P. 15393–15407
8. Richter N., Favalli M., Dalfsen E. et al. Lava flow hazard at Fogo Volcano, Cabo Verde, before and after the 2014–2015 eruption // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2016. – Vol. 16, No 8. – P. 1925–1951. DOI:10.5194/nhess-16-1925-2016
9. Masson D. G., Le Bas T. P., Grevemeyer I. et al. Flank collapse and large-scale landsliding in the Cape Verde Islands, off West Africa // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2008. – Vol. 9, No 7. – P. 1–16. DOI:10.1029/2008GC001983.
10. Мазарович А.О. Оползневые процессы на вулканических постройках северо-восточной части Атлантического океана // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. – 2022. – № 1. Вып. 53. – С. 89 – 103. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-1-53-89-103 Marino et al., 2018
11. Chaytor J. D., Keller R. A., Duncan R. A. et al. Seamount morphology in the Bowie and Cobb hot spot trails, Gulf of Alaska // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2007. Vol. 8. – P. 1–26 Q09016, doi:10.1029/2007GC001712.
12. Мазарович А.О., Соколов С.Ю. Опасность разрушения вулкана Беренберг (остров Ян-Майен, Норвежско-Гренландское море) // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. – 2022. Т. 504. № 2. – С. 163–167. DOI: 10.31857/S2686739722060111
13. Gee M.J.R., Watts A.B., Masson D.G. et al. Landslides and the evolution of El Hierro in the Canary Islands // *Mar. Geology*. – 2001. – Vol. 177. – P. 271–293
14. Schwarz S. Magmatic and volcanological evolution of the Desertas rift zone (Madeira archipelago, NE Atlantic). Dissertation for the doctorate degree of the Department Geosciences at the University of Bremen. Bremen. – 2004. – 106 p.

УДК 551.22

Рубрика 38.57.23

**КАРТИРОВАНИЕ ДАЙКОВОГО КОМПЛЕКСА БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ
ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ**

**MAPPING OF THE DYKE COMPLEX OF THE BARENTS AND KARA SEAS BY
MAGNETIC FIELD**

**Лыгин Иван Владимирович¹, Кузнецов Кирилл Михайлович¹, Арутюнян Давид
Артурович¹, Соколова Татьяна Борисовна¹**

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва

**Lygin Ivan Vladimirovich¹, Kuznetsov Kirill Mikhailovich¹, Arutyunyan David
Arturovich¹, Sokolova Tatiana Borisovna¹**

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow

Введение

В осадочном чехле Баренцева моря на волновых сейсмических разрезах часто встречаются специфические аномалии, представляющие собой серии высокоамплитудных дискордантных субгоризонтальных отражений или столбообразных зон потери корреляции (отсутствия отражений). Такие аномалии волнового поля присутствуют в юрско-меловых и более древних комплексах осадочного чехла. Их природа – магматические образования, внедрявшиеся на протяжении нескольких циклов магматической активности [Норина, 2014; Шлыкова и др., 2017]. Вертикальные внедрения – дайки, согласно результатам ряда работ [Minakov et al., 2017; Arutyunyan et al., 2019; Лыгин и др. 2018; Шипилов и др., 2021] – в магнитном поле могут уверенно проследиваться линейными аномалиями.

Нами собраны и проанализированы опубликованные карты аномальных полей и открытые фондовые материалы гидромагнитных съемок, проведенных в акватории Баренцева и Карского морей за последние 30 лет. По результатам анализа более чем 100 тыс. километров магнитометрических профилей составлена схема расположения даек, представляющих единый магматический комплекс в Баренцево-Карском регионе.

Магнитометрическая изученность Баренцева и Карского морей

В Баренцево-Карском регионе модели аномального магнитного поля базируются на весьма неоднородных по качеству и детальности материалах аэромагнитных съемок разных лет и масштабов. В 1972–1975 гг. выполнены тотально покрывшие основную часть акватории Баренцева моря съемки на высоте 300 м масштаба 1:500 000 (расстояние между основными профилями 5 км); точность наблюдений на тот период составляла $\pm 10\text{--}15$ нТл. К началу 1990-х гг. точность аэромагнитных наблюдений была повышена до ± 4 нТл. В эти годы острова архипелагов Земля Франца-Иосифа и Новая Земля с прилегающими к ним акваториями в несколько этапов были обеспечены более качественными и более детальными (с межпрофильным расстоянием от 2 км) аэросъемками. В ФГБУ “ВСЕГЕИ” составлена карта аномального магнитного поля России масштаба 1 : 2 500 000 [Литвинова и др., 2016]. Разрешение цифровой карты, объединившей результаты разномасштабных современных

съемок, делает возможным прослеживание аномалий размером от 15 км. На отдельных фрагментах и, в первую очередь, на архипелаге Земля Франца-Иосифа и ближайшей к ним части акватории присутствуют аномалии шириной от 6 км, позволяющие надежно выделять оси магнитных неоднородностей линейного типа.

Магнитометрическая изученность Карского моря по сравнению с Баренцевым ниже, систематические аэромагнитные съемки выполнены не на всей акватории. К настоящему времени наиболее плотная сеть (расстояние между профилями 4 км) магнитометрических профилей высокоточной съемки (не хуже ± 5 нТл) приходится на Северо-Карский лицензионный участок. Здесь в 2014 году АО «НПП Аэрогеофизика» по заказу ПАО «Роснефть» выполнена комплексная аэрогеофизическая съемка, материалы которой в настоящее время доступны в Российских геологических фондах ФГБУ «Росгеолфонд».

Для детального анализа нами собраны и систематизированы материалы гидромагнитных съемок, выполненные в разные годы «МАГЭ», «Севморгео», «Севморнефтегеофизика», «Росгео» и другими организациями (Рис. 1). В основном съемки выполнены по методике дифференциальных гидромагнитных наблюдений [Лыгин, 1989], которая позволяет учитывать интенсивные полярные геомагнитные вариации без установки буйковых магнитовариационных станций и уверенно детектировать магнитные аномалии размером в десятки метров и амплитудой менее ± 10 нТл. Общая протяженность профилей, расположенных в разных частях Баренцева моря, превышает 93 тыс. пог. км, в акватории Карского моря – порядка 10 тыс. пог. км.

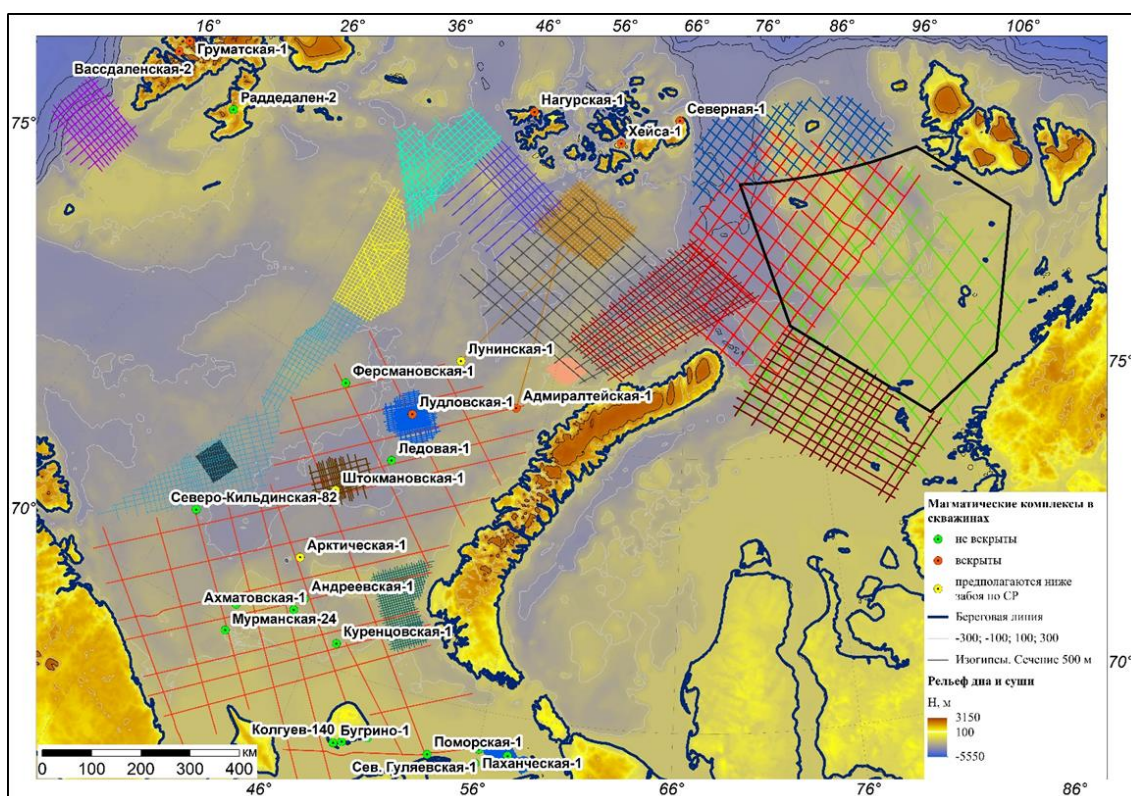


Рис.1. Гидромагнитная изученность Карско-Баренцевоморского региона

Линиями разных цветов на схеме изученности показаны профили гидромагнитных съемок, выполненные российскими научными и производственными организациями в 1995–2017 гг.

Полигон черного цвета – контур аэромагнитной съемки на ЛУ Северо-Карский (2014 г.).

Линейные магнитные аномалии Баренцева и Карского морей

На геологических картах большинства крупных островов архипелага Земля Франца Иосифа отмечены долеритовые и габбро-долеритовые дайки северо-западного простирания, которые ярко проявлены в дневном рельефе и легко читаются на детальных космоснимках. По данным абсолютных определений возраст даек на входящем в состав архипелага о-ве Хейса оценивается в 125.2 ± 5.5 млн. лет (начало апта) [Шипилов, Карякин, 2008]. Авторами упомянутых работ [Шипилов и др., 2021; Minakov et al., 2017]) сопоставлено положение даек, откартированных по морфологии дневного рельефа, с аномалиями магнитного поля. При сопоставлении установлено совпадение осей линейных магнитных аномалий с положениями даек. Линейные аномалии на архипелагах Шпицберген и Земля Франц-Иосифа имеют близкие параметры, что говорит о возможности одинакового генезиса интрузивных тел. Данный вывод обосновывает применение магниторазведки и, в частности, изучение высокочастотных составляющих аномального магнитного поля с целью картирования даек на акватории Баренцево-Карского региона.

Линейные магнитные аномалии хорошо прослеживаются по гидро- и аэромагнитным данным высокого качества масштаба 1: 200 000 и крупнее. Обычно их поперечные размеры не превышают 2.5–3 км, протяженность – сотни километров; амплитуда аномалий в среднем менее 10 нТл. Для их выделения на рассматриваемых площадях гидромагнитных съемок (рис. 1) нами использован единый подход, предполагающий применение высокочастотного фильтра с периодом среза 10 км.

Выявленные локальные линейные аномалии, имеют преимущественно северо-западное простирание и протяженность до 500–600 км. Они являются секущими по отношению к региональным аномалиям магнитного поля и устойчиво сохраняют свои параметры (простирание, форму, размеры и амплитуду) на всем протяжении, что говорит об их единой тектонической природе. Преимущественные глубины залегания верхних кромок источников не более 2 км. Линейные аномалии распространены практически на всей российской акватории Баренцева моря (за исключением его южной части) и в северной части Карского моря. Совокупность доступной геолого-геофизической информации позволяет обоснованно считать источниками линейных магнитных аномалий субвертикальные дайки габбро-долеритового состава.

Схема расположения магматических тел (даек), установленных нами в ходе анализа, приведена на рисунке 2. При картировании даек вблизи архипелагов Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, Шпицберген нами привлекались материалы публикаций [Minakov et al., 2017; Шипилов и др., 2021], основанные на анализе аэромагнитных данных.

На схеме (см. рис. 2) дайки ранжированы на достоверные и прогнозные. Достоверные дайки выделены только в зонах, обеспеченных качественными магнитометрическими материалами. К таковым относятся площади гидромагнитных съемок, аэромагнитных съемок над и вблизи архипелагов Земля Франца Иосифа, Новая Земля, Шпицберген и в пределах Северо-Карского лицензионного участка.

Прогнозные дайки просматриваются в аномальном магнитном поле характерными «линейными аномальными зонами» и часто наращивают линейные аномалии, хорошо различимые в материалах гидромагнитных съемок (Штокмановская, Лудловская и др.). Также прогнозные дайки выделены в аномальном магнитном поле, составленном по аэромагнитной съемке 1975 года, направление профилей которой ортогонально генеральному простиранию дайкового комплекса. Дайки к югу от архипелага Шпицберген в области, для которой аномальное магнитное поле не прорисовано, выделены по магнитным аномалиям не приведенной модели CAMP-GM [Gaina et al., 2009]. Близкие по положению дайки выделены в работе [Minakov et al., 2017].

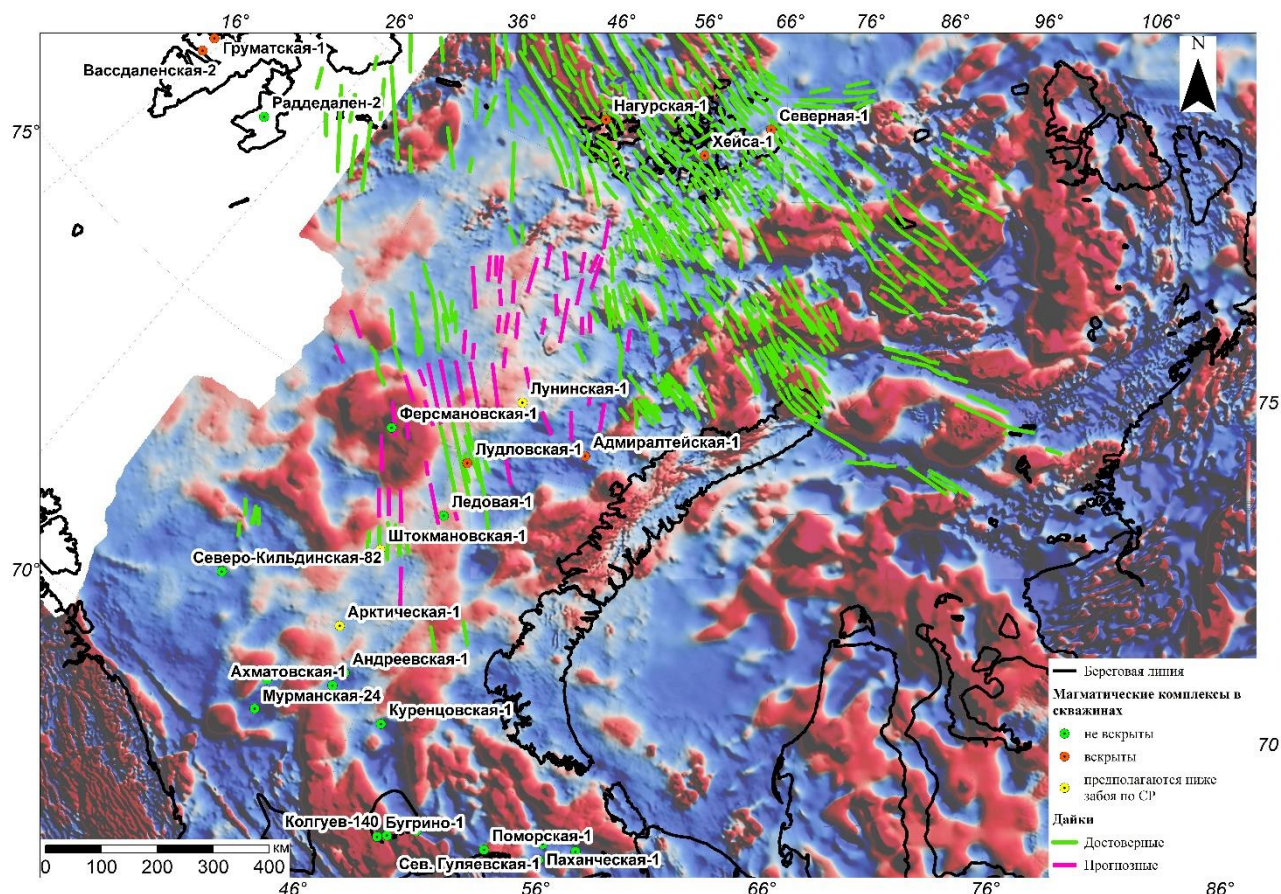


Рис. 2. Дайковый комплекс в Баренцево-Карском регионе по магнитометрическим данным

Линиями зеленого и розового цвета показаны достоверные и прогнозные дайки соответственно. В качестве подложки использована цифровая модель аномального магнитного поля в редакции ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Литвинова и др., 2016]. На рисунке приведены скважины, вскрывшие магматические комплексы (красные кружки) или не вскрывшие их (зеленые), а также скважины, в которых предполагается наличие магнитных комплексов в осадочном чехле ниже забоя (желтые кружки).

Установленные по магнитному полю дайки распределены следующим образом: на Лудловском поднятии – более шести даек; на Штокмановском поднятии – более четырех; на Адмиралтейском валу (структура Пахтусовская) – не менее восьми; на поднятии Вернадского (лицензионный участок Персеевский) – не менее пяти; на своде Федынского – не менее трёх; вблизи Гусиноземельского поднятия – две; к югу и юго-западу от архипелага Земля Франца-Иосифа (поднятия Пинегина, прогиб Франц-Виктории) – несколько десятков; между архипелагами Земля Франца-Иосифа и Новая Земля – несколько десятков; на северной оконечности Новой Земли – не менее пяти; на мегавале Визе – не менее десяти; на других поднятиях в северной части Карского моря – единичные.

Выводы

Проведен анализ локальной компоненты аномального магнитного поля по площадным съемкам, которые покрывают большую часть Баренцева моря и северной части Карского моря. Широко распространенные в упомянутых акваториях линейные аномалии локальной

компоненты магнитного поля обусловлены дайками габбро-долеритового состава, образующими единый магматический комплекс. По изменению генерального простирания даек их можно объединить в несколько роев, которые могут характеризовать этапность внедрений и особенности геодинамических режимов.

Помимо выявленного дайкового комплекса северо-западного простирания в аномальном магнитном поле проявлены локальные очаги магматизма, системы магнитных источников иного простирания, которые требуют дополнительных, зачастую целенаправленных комплексных геолого-геофизических исследований.

Весьма актуальным для изучения особенностей структуры и истории развития дайкового комплекса является продолжение морских гидромагнитных съемок на акваториях, на которых дайки в настоящее время выявлены неуверенно (предположительно) или отсутствуют.

Финансирование

Исследование выполнено в целях реализации Программы развития Московского университета (Соглашение № 195 от 15 сентября 2023 г.) для обеспечения работой морского продольного градиентометра MariMag-300m.

Исследование выполнено в рамках проекта «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики», номер договора 5-15-2021, номер ЦИТИС: 121042200088-6.

Список литературы:

1. Лыгин В.А. Дифференциальная магнитная съемка на акваториях // Автореферат на соискание степени кандидата технических наук. 04.00.12 / МГУ им. М.В. Ломоносова. – Москва. – 1989. – 245 с.
2. Лыгин И.В., Мясоедов Н.К., Твердохлебов Д.Н. Повышение информативности геологических моделей с привлечением данных гравиразведки и магниторазведки // Труды Международной геолого-геофизической конференции ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии. — ООО ПолиПРЕСС. – Тверь. – 2018. – С. 290–295.
3. Литвинова Т.П., Красинский Е.М., Глебовский В.Ю., Белов Е.А., Бойко А.В., Воронова М. А., Васильева С.И. Карта аномального магнитного поля России. Масштаб 1 : 2500000. ВСЕГЕИ. 2016. URL: <https://vsegei.ru/ru/info/atlas/mag/>
4. Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю., Клещина Л.Н., Мазекина А.В., Ульянов Г.В., Мятчин О.М. Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ // Геология нефти и газа. – 2020. – № 2. – С. 107–120. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-2-107-120.
5. Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Шкарубо С.И. Природа региональных магнитных аномалий северо-востока Баренцево-Карской континентальной окраины по результатам интерпретации сейсмических данных // Арктика: экология и экономика. – 2021. – Т. 11. – № 2. – С. 195–204. – DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-195-204.
6. Arutyunyan D.A., Lygin I.V., Sokolova T.B., Bulychev A.A., Kuznetsov K.M., Krivosheya K.V. Parameters of Magmatic Formations in the Barents Sea According to Hydromagnetic // Marine

Technologies 2019. – Apr 2019. – EAGE – Gelendzhik. – Russia. –Volume 2019. – P. 1 – 5. DOI: 10.3997/2214-4609.201901805.

7. Gaina, C., Werner S.C. and the CAMP-GM group. CIRCUM-ARCTIC MAPPING PROJECT-GRAVITY AND MAGNETIC MAPS (CAMP-GM). – 2009.
8. Minakov A., Yarushina V., Faleide J.I., Krupnova N., Sakoulina T., Dergunov N., Glebovsky V. Dyke emplacement and crustal structure within a continental large igneous province, northern Barents Sea / BOOK CHAPTER: Pease, V. & Coakley, B. (eds) Circum-Arctic Lithosphere Evolution. Geological Society. – London. – Special Publications. – 2017. – 460. – ISBN electronic: 9781786203410. – DOI: 10.1144/SP460.4.

УДК 553.98

Рубрика 38.53.17

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ
МЕГАВАЛА НАЛИВКИНА, КАРСКОЕ МОРЕ

TECTONIC FACTORS OF PETROLEUM POTENTIAL OF THE NALIVKIN
MEGASWELL, THE KARA SEA

**Кишанков Алексей Владимирович¹, Полудеткина Елена Николаевна², Басова
Евгения Денисовна², Кирсанова Анастасия Александровна², Токарев Михаил
Юрьевич²**

¹ ИПНГ РАН, г. Москва

² МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

**Kishankov Aleksei Vladimirovich¹, Poludetkina Elena Nikolayevna², Basova Evgeniya
Denisovna², Kirsanova Anastasia Aleksandrovna², Tokarev Mikhail Yurievich²**

¹ OGRI RAS, Moscow

² Lomonosov Moscow State University, Moscow

Введение

В июле-августе 2022 г. состоялась экспедиция TTR-21 в северную часть Карского моря, организованная Учебно-научным центром ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике при МГУ имени М.В. Ломоносова. Целью экспедиции являлось изучение ледниковых форм рельефа морского дна, состава придонных отложений, строения верхней части разреза осадочного чехла, флюидонасыщенности приповерхностных осадков. Одним из объектов исследования в ходе экспедиции являлась южная часть мегавала Наливкина – крупной линейной структуры, простирающейся с юга на север в северной части акватории Карского моря. Изучение верхней части разреза осадочного чехла, содержания и состава флюидов в придонных осадках имеет практическое значение для прогноза нефтегазоносности рассматриваемой структуры, поскольку исследование флюидопроявлений на поверхности, с учетом данных по истории тектонического развития, даёт информацию о глубинных процессах образования залежей углеводородов. Целью работы являлось изучение перспектив нефтегазоносности мегавала, в основном, с точки зрения его тектонического развития.

Геологическое строение района исследования

Фундамент Северо-Карского осадочного бассейна сложен кембрийскими и более древними метаморфизованными породами [Малышев и др., 2012]. Осадочный чехол состоит из двух основных структурных этажей – докаменноугольного и каменноугольного-мезозойского. Между данными этажами на сейсмических разрезах четко прослеживается угловое несогласие.

Нижний структурный этаж по составу является терригенно-карбонатным, верхний – преимущественно терригенным, кроме того, в среднем ордовике присутствуют эвапориты [Старцева, 2018]. Нефтегазоматеринские толщи прогнозируются, по аналогии с разрезами

Таймыра, Северной Земли и Восточной Сибири, в ордовике, силуре и девоне [Старцева, 2018]. В данных комплексах также прогнозируется наличие резервуаров и флюидоупоров.

Складчатые структуры в Северо-Карском бассейне формировались на разных этапах истории развития региона. Основная фаза образования складок имела место на рубеже девона и карбона, после которой произошел интенсивный размыв и образовалось региональное угловое несогласие, отмеченное выше [Малышев и др., 2012]. Также инверсионные структуры формировались на рубеже ордовика и силура, силура и раннего девона, раннего и среднего девона. Формирование мегавала Наливкина началось, предположительно, на рубеже силура и девона, и его рост продолжался на последующих этапах тектонических деформаций [Никишин, 2013]. Мегавал в настоящее время имеет асимметричное строение – с запада он перекрывается полого залегающими толщами, предположительно, девонского возраста, на востоке поднятие ограничено крутозалегающими, видимо, взброшенными слоями, возможно, включающими породы фундамента. На юге мегавала Наливкина взброшенные слои находятся примерно в 10 км к востоку от основной части структуры, формируя отдельное локальное поднятие.

Методы исследования

В ходе экспедиции TTR-21 был проведен комплекс геолого-геофизических исследований – выполнялась сейсморазведка сверхвысокого разрешения (количество каналов – 16, шаг между каналами – 2 м), акустическое профилирование, отбор донных отложений (при помощи прямоточной гравитационной трубы длиной 3 и 4,5 м) для литолого-геохимических анализов. Детально изучалось локальное поднятие, образованное взброшенными древними слоями к востоку от мегавала Наливкина, отмеченное выше. Были отобраны осадки над локальным поднятием и газовая фаза из данных отложений. Выполнялись компонентные и изотопные исследования газовой фазы и хроматографический анализ битумоидов. Кроме того, анализировались архивные сейсмические данные.

Результаты

На основе полученных в ходе экспедиции и архивных сейсмических данных было сделано предположение о, по меньшей мере, двух этапах формирования локального поднятия и всей надвиговой (взбросовой) зоны вдоль восточной окраины мегавала Наливкина: до масштабной эрозии в девонское-каменноугольное время, и после неё. Предполагается, что в карбоне произошла коллизия Северо-Таймырской зоны с Северо-Карским блоком, в результате которой в южной части Северо-Карского бассейна образовался надвиговой фронт Большевик, а также активизировались тектонические движения по всему бассейну [Малышев и др., 2012, Никишин, 2013]. Вероятно, в это же время надвиговая зона сформировалась и вдоль мегавала Наливкина. Вторая фаза деформации, наиболее вероятно, произошла в позднем мелу или кайнозое, так как, предположительно, только меловые отложения перекрывают мегавал Наливкина в составе верхнего структурного этажа, и деформированные толщи с сохранением мощности прослеживаются в нём вплоть до придонных отложений.

По результатам компонентных и изотопных исследований газовой фазы и хроматографического анализа битумоидов установлено наличие в придонных осадках миграционных газообразных и жидких углеводородов. Отмеченные выше тектонические движения должны были способствовать миграции углеводородов к приповерхностным отложениям. На основе сейсмических данных и результатов стратиграфического бурения, выполненного в 2020 г. [Malyshev et al., 2023], сделан вывод о том, что вследствие складчато-

надвиговых деформаций, у свода поднятия могут присутствовать древние отложения ордовика и силура, в которых, как отмечено выше, прогнозируются элементы углеводородных систем.

Выводы

В результате работы показана предполагаемая история развития мегавала Наливкина, в частности, основные этапы тектонических движений, которые могли способствовать накоплению углеводородов в верхней части осадочного чехла. Также установлен термогенный генезис газов в придонных отложениях, и сделаны выводы о возрасте потенциальных резервуаров в районе исследования.

Экспедиционные работы выполнялись при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках:

- плана-программы экспедиционных исследований МГУ имени М.В. Ломоносова по теме «Особенности четвертичного седиментогенеза, рельефообразования и природной флюидоразгрузки на морском дне в северо-восточной части Карского моря» и «Обучение-через-исследования на Арктическом шельфе»;
- государственного задания Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» «Дополнительное обеспечение системы образования в области морских наук – подготовка молодого кадрового резерва по научно образовательной программе «Плавающий университет» на основе комплексных исследований морей России и Мирового океана».
- государственного задания ИО РАН «Обеспечение проведения научных исследований, а также экспериментальных разработок».

Список литературы:

1. Малышев Н. А., Никишин В. А., Никишин А. М. и др. Новая модель геологического строения и истории формирования Северо-Карского осадочного бассейна // Доклады академии наук. – 2012. – Т. 445. – № 1. – С. 50-50.
2. Никишин В. А. Внутриплитные и окраинноплитные деформации осадочных бассейнов Карского моря: дисс. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2013. – 135 с.
3. Старцева К. Ф. Этапы формирования Восточно-Баренцевского и Северо-Карского бассейнов на основе сеймостратиграфического анализа: дисс. – М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2018. – 165 с.
4. Malyshev N. A., Verzhbitskii V. E., Skaryatin M. V. et al. Stratigraphic Drilling in the Northern Kara Sea: First Case and Preliminary Results // Russian Geology and Geophysics. – 2023. – V. 64. – No. 3. – P. 257-269.

УДК 551.352

Рубрика 38.35.00

МИНЕРАЛОГИЯ И СОСТАВ МИКРОФОССИЛИЙ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
ДОЛИНЫ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ВИМА, КАК ДОКАЗАТЕЛЬСТВО
ЛАТЕРАЛЬНОГО ПЕРЕНОСА ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА

MINERALOGY AND MICROFOSSILS FROM THE QUATERNARY SEDIMENTS OF THE
VEMA TRANSFORM VALLEY AS AN EVIDENCE OF LATERAL TRANSPORT OF
TERRIGENOUS MATERIAL

**Борисов Дмитрий Геннадьевич¹, Мурдмаа Ивар Оскарович¹, Дара Ольга
Марковна¹, Лыкова Мария Александровна², Иванова Елена Владимировна¹**

¹ *Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН (ИО РАН), Москва*

² *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва*

**Borisov Dmitrii Gennadievich¹, Murdmaa Ivar Oskarovich¹, Dara Olga Markovna¹,
Lykova Maria Aleksandrovna², Ivanova Elena Vladimirovna¹**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS (IO RAS), Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Введение

Основной задачей данной работы было изучение состава осадкообразующих минералов и микрофоссилий в колонках из восточной и западной частей долины разлома Вима. Полученные результаты были использованы для проверки гипотезы о латеральном транспорте как терригенного осадочного вещества из конусов выноса рек Амазонка и Ориноко, так и захваченных в ходе переноса микрофоссилий. Предположение о быстром (в масштабах геологического времени) заполнении долины разлома тонкозернистыми выносами Амазонки было высказано еще в середине прошлого века [напр., van Andel et al., 1967], но прямых минералогических доказательств почти нет. Результаты данной работы подробно изложены в работе [Мурдмаа и др., 2023].

Материалы и методы

Материалом для исследования послужили образцы из колонок донных осадков АНС45-37 и АНС45-48, отобранных ударной трубкой в 45-м рейсе НИС "Академик Николай Страхов" из восточной и западной частей долины разлома Вима, соответственно [Иванова и др., 2020]. Для сравнения были проанализированы несколько проб донных осадков из конуса выноса Амазонки, полученных в той же экспедиции. Основными методами исследования были полуколичественный рентгенографический фазовый анализ валовых порошковых препаратов на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS), определение видов планктонных фораминифер под бинокляром в песчаной фракции сухого осадка и определение видов наннопланктона под сканирующим электронным микроскопом [Мурдмаа и др., 2023].

Результаты и Обсуждение

В колонках выделяются небольшие по мощности интервалы известковых илов и песков (характерная для долины Вима "известковая шапка"), и нижележащая толща восстановленных терригенных илов. В результате пересчета результатов валового анализа на бескальцитовое вещество установлено, что в терригенном материале резко преобладают кварц (в среднем 25-27%) и сумма четырех глинистых минералов (в среднем 53-57%): смектит, иллит, хлорит и каолинит. В изученных 5 образцах осадков района конуса выноса Амазонки встречены те же основные компоненты – кварц (29-33%) и сумма глинистых минералов (49-63%). В обеих колонках и в пробах с трех станций из района конуса выноса Амазонки диагностированы щелочно-щелочноземельный диоктаэдрический смектит (монтмориллонит), магнезиально-железистый хлорит, каолинит и иллит с минимальным количеством разбухающих слоев. Среди глинистых минералов в пяти пробах конуса выноса Амазонки и примыкающей к нему с севера абиссальной равнины преобладают хлорит и каолинит.

В четвертичных комплексах планктонных фораминифер из известковых осадков с индекс видами *Globigerinoides ruber* (pink) и *Globorotalia truncatulinoides* единично встречены неогеновые виды: *Globorotalia exilis*, *Dentaglobigerina altispira*, *Neogloboquadrina humerosa*, *Neogloboquadrina acostaensis*, *Globigerinoides obliquus*. В смер-слайдах, наряду с редкими ныне живущими кокколитами, отмечены единичные дискоастеры: *D. broweri* и *D. pentaradiatus*.

Сопоставление результатов рентгеновского фазового анализа минерального состава терригенного компонента колонок АНС45-37 и АНС45-48 показало их близкое сходство между собой, что доказывает единство источника сноса на всем протяжении трансформной долины. Полученные для осадков конуса выноса Амазонки средние процентные содержания основных компонентов – кварца (29-33%) и суммы глинистых минералов (49-63%) близки средним величинам содержания этих компонентов в колонках осадков долины Вима. Это позволяет считать переотложенные осадки конуса выноса Амазонки главным источником терригенного материала для долины разлома Вима. При этом наиболее надежным критерием источника терригенного материала следует считать сходное соотношение глинистых минералов.

Источником биогенного материала, наряду с биологической продуктивностью поверхностных вод, является эрозия осадков ограничивающих долину возвышенностей на пути придонных облаков взвеси. Об этом свидетельствует присутствие неоген-раннечетвертичных дискоастеров и раковин фораминифер в обеих колонках. Скорее всего, они попадают в долину в результате эрозии осадков на возвышенности к северу от долины и на склоне крупного поперечного хребта к югу, с последующим смывом известкового биогенного материала турбидными потоками. Косвенно в пользу этого говорит наличие спикул губок, растущих преимущественно на подводных склонах.

Наши данные указывают на размыв продуктов гумидного тропического выветривания в нижнем течении Амазонки, как один из источников терригенного материала ее выносов, наряду с Андами. Мы придерживаемся гипотезы, предполагающей движение придонных облаков взвеси, с торможением, через ограничивающие долину хребты, где происходит частичное осаждение и смешивание с биогенным кальцитом. Гравитационные потоки с континентального склона Южной Америки (например, из района поднятия Демерара [van Andel et al., 1967]) видимо являются одним из важнейших процессов транспортировки осадочного материала в долину разлома Вима.

Заключение

Источником биогенного материала, наряду с биологической продуктивностью поверхностных вод, является эрозия осадков, покрывающих возвышенности к северу и югу от долины, на пути придонных облаков взвеси. Об этом свидетельствует присутствие неоген-раннечетверичных дискоастеров и раковин фораминифер в обеих колонках. Скорее всего, они попадают в долину в результате эрозии осадков на возвышенности, ограничивающей долину с севера, и на поперечном хребте на юге, с последующим смывом известкового биогенного материала турбидными потоками.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ 22-27-00421.

Список литературы:

1. Иванова Е.В., Сколотнев С.Г., Борисов Д.Г. и др. Комплексные исследования зон трансформных разломов Долдрамс и Вима в 45-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” // *Океанология*. –2020. –Т.60. №3 – С. 488–490.
2. Мурдмаа И.О., Дара О.М., Лыкова М.А., Борисов Д.Г., Иванова Е.В. Минералогия четвертичных отложений долины трансформного разлома Вимя (Центральная Атлантика) // *Океанология*. –2023. –Т.63. №5 – С. 1–20.
3. Van Andel T.H., Corliss J.B. and Bowen V.T. The intersection between the Mid-Atlantic Ridge and the Vema Fracture Zone in the North Atlantic // *Marine Res.* – 1967. – V. 25. – P. 343-351.

УДК 551.336

Рубрика 38.47.17

РАЗВИТИЕ ПОДВИЖЕК КУПОЛОВ ДРЕВНЕГО БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО
ЛЕДНИКОВОГО ЩИТА

SURGE DEVELOPMENT OF DOMES OF THE ANCIENT BARENTS-KARA ICE SHEET

Кашдан Адам Израилевич¹, Шейнкман Владимир Семенович²

¹ *Факультет естественных наук и математики, Колледж ТАВ, Монреаль, Квебек, Канада*

² *Институт криосферы Земли ФИЦ Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень*

Kashdan Adam Izrailovich¹, Sheinkman Vladimir Semenovich²

¹ *Science and Mathematics Department, TAV College, Montreal, Quebec, Canada*

² *Earth Cryosphere Institute FRS Tyumen Science Center SB RAS, Tyumen, Russia*

Введение

Мы представляем теоретическую схему, которая обобщает данные о динамике ледниковых щитов, ограниченных в их развитии характером рельефа ложа, и интерпретируем следы их геологической деятельности в Баренцевом и Карском море. Геоорфологические ограничения обусловлены образованиями в виде ясно выраженных неровностей ложа, связанных с краевыми ледниковыми формами рельефа. В данной работе мы рассматриваем проблему, которая может возникнуть при экстремальных подвижках ледников (сёрджей) [Бушуева и др., 2018] - при воздействии теплового переключателя с изменением энтальпии [Benn et al., 2019], связанного с состоянием ложа. Поскольку топографическая впадина задает ширину потока ледникового щита и ограничивает латеральный дренаж талых вод, проблема попадает в сферу действия модели недренированного пластического слоя [Tulaczyk, 2000] на ложе ледника. Используя эту модель, мы исследовали внешние регуляторы поведения ледников (например, внешний масс-баланс, пики рельефа ложа) и проверили их на соответствие данным по современным наблюдениям на ледниках Антарктики, Гренландии, Канадской и Российской Арктики. С помощью теоретической схемы безразмерности, разработанной Сянь-Ванг Оу [Hsien-Wang Ou, 2021], мы построили двумерную диаграмму режимов, которая позволяет сделать реконструкцию динамики ледника во всем диапазоне внешних условий, как климатических, так и связанных с их размерами.

Материалы и методы

На первом этапе моделирования мы рассматривали ледовый поток, вмещаемый в условной топографической впадине с постоянной глубиной (пунктирная линия на рис. 1а). Большая мощность ледника в этой впадине в русле основного потока вызывает дополнительные напряжения во льду, а следовательно и более быстрое его течение, потом которого ограничен сбоку малоподвижным льдом ледникового покрова. Поскольку пик напряжения приходится в основном на область между зоной накопления льда и зоной увеличения скорости течения, где, вероятно, и начинается сама подвижка [Bindschadler, 2001], переменные в нашей математической модели (см. рис. 1б) относятся к этой средней части (заштрихована область на рис. 1а), где термический переход с изменением энтальпии наиболее активен. При этом мы

не рассматривали в ходе исследований продольные изменения, связанные с адвекцией или кинематической волной [Nye, 1960; Clarke и др., 1984]. Продольный размер как параметр определялся только через половину длины ледника, которую мы принимаем за исходный параметр. Для нашего моделирования, и нахождения расстояния от верхнего ледосбора и определения наклона поверхности. В этот параметр можно включить ледосборный вклад притоков или внутреннее увлечение потока льда за счет резкого изменения наклона поверхности. Именно такая пространственная “кусковая модель” – lumped model обычно используется при оценке поведения подвижек ледников [Войтковский, 1974; Benn et al., 2019]. В основе данной модели лежит предположение о том, что зарождение подвижек происходит в зоне аккумуляции, где масс-балансовый приход превышает чистую абляцию, в то время как некоторые сёрджи зарождаются в зоне абляции ледника [Abe et al., 2016].

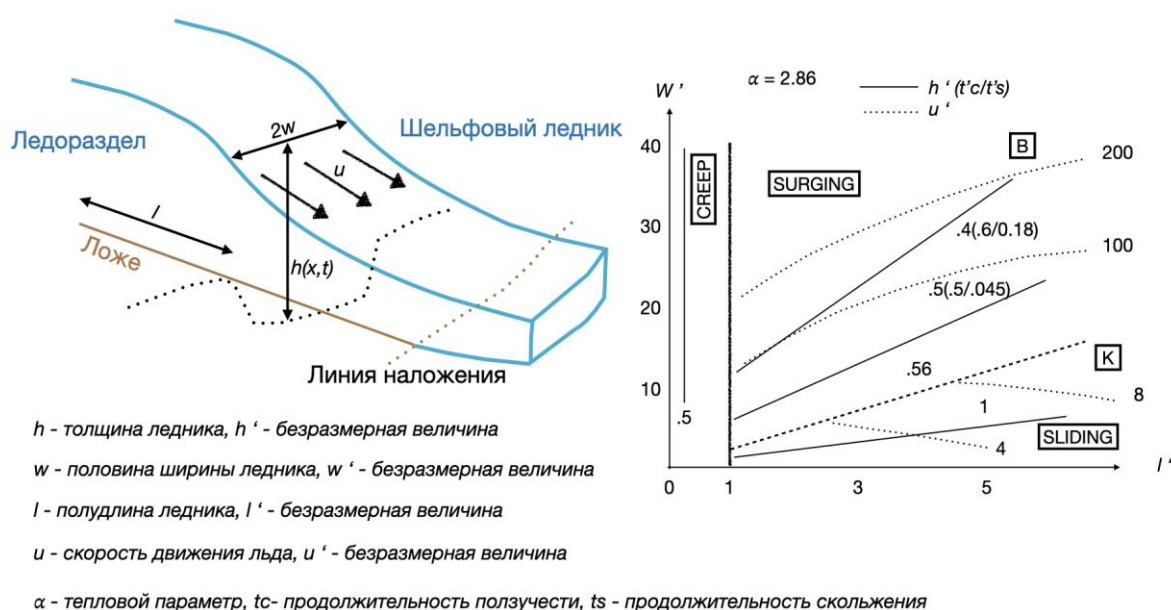


Рис. 1 Двумерная диаграмма режимов палеоледников построенная с помощью теоретической схемы безразмерности, разработанной Сянь-Ванг Оу [Hsien-Wang Ou, 2021]. К - палеопоток по желобам Орла и Короля Карла, В - палеопоток по Медвежинского желобу.

На втором этапе моделирования, чтобы понять, как неровности ложа ледника влияют на его динамическую устойчивость и неустойчивость, мы сначала рассмотрели их влияние на устойчивое положение линии налегания ледника на ложе, а затем – их влияние на устойчивость ледникового тела на шельфе. Для моделирования ледника на морском ложе на завершающей стадии его развития вблизи отмеченных неровностей ложа использована одномерная модель такого ледника, которая решает приближенную задачу продвижения шельфового ледника на мелководье SSA – shallow stream/shelf approximation [MacAyeal, 1989] и уравнения сохранения массы ледника для определения изменений его толщины, скорости и конечного положения [Schoof, 2007; Tsai et al., 2015; Sergienko, Haseloff, 2023]. Предполагается, что ложе ледника заканчивалось там, где он погружается в морскую воду, и в случаях, которые мы рассматриваем в данном исследовании, ледяной поток в основном двигался по дну в умеренно скользящем режиме до периода подвижки.

Мы смоделировали скорость движения ледника, его толщину и конечное положение для предписанного баланса поверхностной массы (с учетом годового снежного питания и поверхностного таяния), который мы предполагаем равномерным по поверхности ледника. Конечное положение ледника точно моделируется с помощью уточненной подвижной сетки, а его устойчивые состояния определяются путем численного решения для различных состояний ледового потока. Мы также воспроизвели суть результатов, в устойчивых и неустойчивых режимах ледника, используя моделирование с высоким разрешением численной модели ледника.

Результаты и их обсуждение

Были проведены исследования чувствительности математических моделей SSA по отдельным параметрам, которые были подчинены нашей режимной 2D диаграмме с учетом более широкого охвата внешних морфологических и климатических условий. Robel и другие (2013), например, считают, что более высокая температура и геотермальный поток благоприятствуют устойчивому скользящему режиму, а Kyrke-Smith и другие (2013) обнаружили ту же тенденцию при увеличении среднегодовых твердых осадков в зоне аккумуляции. Оба эти случая мы можем увидеть на нашей 2D диаграмме режимов, поскольку уменьшение безразмерной толщины и/или увеличение безразмерного расстояния от линии наложения приводит к увеличению эффективной площади ледника с низкой энтальпией и способствует режиму устойчивого скольжения без подвижки. Calov и другие (2002) считают, что ускорение скольжения (за счет увеличения параметра скольжения) приводит к выявлению событий Хайнриха и удлинению их периодов в исследованных геологических колонках, что также видно из нашей режимной диаграммы - поскольку такое усиление приводит к увеличению безразмерной ширины ледника, увеличивая тем самым диапазон безразмерных толщин и соответственно удлинению периодов событий Хайнриха. Calov и другие (2002) считают, что ускорение скольжения (за счет изменения параметров скольжения) приводит к выявлению событий Хайнриха и удлинению их периодов в исследованных геологических колонках, что также видно на нашей режимной диаграмме - так как выявление индикаторов расширения оледенения отражается в нашей модели как увеличение безразмерной ширины ледника и/или безразмерной толщины и, соответственно, удлинение периодов событий Хайнриха. Хотя подвижки ледника больше связаны с периодом дегляциации [Бушуева и др., 2018; Wutiahlowsky et al., 2023] и с большей вероятностью изменением энтальпии, т.е. по времени это конец событий Хайнриха (например H1 и H2) или пик в осцилляции Дансгора-Эшгера.

Заключение

В данной работе мы рассмотрели динамику и неустойчивость ледников, ограниченных размерами топографической впадины. Такой тип сёрджей фиксирован шириной ледового потока и сдерживает боковой отвод талых вод из под ледника. В таком случае эта проблема попадает в сферу действия модели недренированного пластического слоя [Tulaczyk, 2000], которая не содержит ни одного свободного параметра и поэтому может быть проверена на достоверность по результатам современных наблюдений на пульсирующих ледниках, например на леднике Монакобрин на северном Шпицбергене [Oerlemans, 2018]. Используя схему безразмерности Сянь-Ванг Оу [Hsien-Wang Ou, 2021], мы построили двумерную диаграмму, отображающую ледниковые режимы устойчивой ползучести, циклической пульсации и устойчивого скольжения, по которой можно легко прогнозировать динамические свойства ледников в диапазоне внешних условий - таких как климатический форсинг, подстилающие породы и пики ложа ледника.

Помимо выявления качественной зависимости на основе нашей SSA модели, режимная 2D диаграмма применялась к наблюдаемым современным ледникам для количественных

сравнений с палеоледниками. Для современных ледников Шпицбергена наша модель предсказывает минимальную полудлину 10 км для пульсирующих ледников; а для ледников более холодной и сухой Арктической Канады эта пороговая полудлина увеличивается до 100 км, что является значительной разницей, согласующейся с данными современных наблюдений. Для ледовых палеопотоков по желобам Орла и Короля Карла мы видим, что большая часть длины потока, выходящего из зоны аккумуляции может обеспечить скользящий по ложу поток в квазиустойчивом состоянии. С другой стороны, при большей ширине потока по верховью Медвежинского желоба сильно возрастает скорость скользящего потока, который уже не может быть полностью принят из зоны аккумуляции, что приводит к возникновению подвижек, которые синхронизируются с событиями Хайнриха и осцилляциями Дансгора-Эшгера.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке госзаданий SB RAS No121042000078-9, 121041600042-7.

Список литературы

1. Бушueva И.С., Глазовский А.Ф., Носенко, Г.А. Развитие подвижки в западной части ледникового купола Вавилова на Северной Земле в 1963–2017 гг // Лёд и снег. 2018. 58(3). С. 293-306.
2. Войтковский К.Ф. О механизме подвижки ледника Медвежьего // МГИ. 1974. Вып. 24. С. 68-77.
3. Abe T., Furuya M., Sakakibara D. Brief communication: twelve-year cyclic surging episodes at Donjek Glacier in Yukon, Canada // Cryosphere. 2016. 10 (4). pp. 1427–1432.
4. Benn D.I., Fowler A.C., Hewitt I., Sevestre H. A general theory of glacier surges // Journal of Glaciology. 2019. 65(253). pp. 701-716.
5. Bindschadler R.A., Bamber J.L. and Anandakrishnan S. Onset of streaming flow in the Siple Coast Region, West Antarctica. In Alley R.B. and Bindschadler R.A. (eds), The West Antarctic Ice Sheet: Behaviour and Environment. Antarctic Research Series. 2001. vol. 77. Washington, DC: AGU, pp. 123–136.
6. Clarke G.K.C., Collins S.G. and Thompson D.E. Flow, thermal structure, and subglacial conditions of a surge-type glacier // Canadian Journal of Earth Sciences. 1984. 21(2). pp.232–240. doi:10.1139/e84-024
7. Calov R., Ganopolski A., Petoukhov V., Claussen M., Greve R. Large-scale instabilities of the Laurentide ice sheet simulated in a fully coupled climate-system model // Geophysical Research Letters. 2002. 29(24), 2216. doi:10.1029/2002GL016078
8. Kyrke-Smith T.M., Katz R.F., Fowler A.C. Stress balances of ice streams in a vertically integrated, higher-order formulation // Journal of Glaciology. 2013. 59(215). pp. 449–466. doi:10.3189/2013JoG12J140
9. MacAyeal D.R. Large-scale ice flow over a viscous basal sediment: Theory and application to ice stream B, Antarctica // Journal of Geophysical Research. 1989. 94(B4). pp. 4071–4087. doi:10.1029/JB094iB04p04071

10. Nye J.F. The response of glaciers and ice-sheets to seasonal and climatic changes. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1960. 256(1287). pp. 559–584. doi:10.1098/rspa.1960.0127
11. Oerlemans J. Modelling the late Holocene and future evolution of Monacobreen, northern Spitsbergen // *The Cryosphere*. 2018. 12(9). pp. 3001-3015.
12. *Ou H.W.* A theory of glacier dynamics and instabilities Part 1: Topographically confined glaciers // *Journal of Glaciology*. 2022. 68(267). pp. 1-12.
13. Robel A.A., DeGiuli E., Schoof C., Tziperman E. Dynamics of ice stream temporal variability: modes, scales, and hysteresis // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2013. 118(2). pp. 925–936. doi: 10.1002/jgrf. 20072
14. Schoof C. Ice sheet grounding line dynamics: Steady states, stability, and hysteresis // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2007. 112(F3).
15. Sergienko O., Haseloff, M. ‘Stable’ and ‘unstable’ are not useful descriptions of marine ice sheets in the Earth's climate system // *Journal of Glaciology*. 2023. pp. 1-17.
16. Tsai V.C., Stewart A.L., Thompson A.F. Marine ice-sheet profiles and stability under Coulomb basal conditions // *Journal of Glaciology*. 2015. 61(226). pp. 205-215.
17. *Tulaczyk S., Kamb, W.B., Engelhardt H.F.* Basal mechanics of Ice Stream B, west Antarctica: 2. Undrained plastic bed model // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2000. 105(B1). pp. 483-494.
18. Wytiahlowsky H., Stokes C. R., Evans D. J. Remote sensing of glacier change (1965–2021) and identification of surge-type glaciers on Severnaya Zemlya, Russian High Arctic // *Journal of Glaciology*. 2023. 1-21.

УДК 551.89(268.53)

Рубрика 38.47.00

СОВРЕМЕННАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ КРИОЛИТОЗОНЫ ШЕЛЬФА ВОСТОЧНОЙ СИБИРИ

MODERN STUDY OF THE PERMAFROST ZONE OF THE EASTERN SIBERIA SHELF

Гаврилов Анатолий Васильевич¹, Малахова Валентина Владимировна², Пижанкова Елена Ивановна¹, Попова Александра Александровна³

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск

³ ООО «Северные Изыскания», Москва

Gavrilov Anatoly Vasilievich¹, Malakhova Valentina Vladimirovna², Pizhankova Elena Ivanovna¹, Popova Alexandra Alexandrovna³

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow

² Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk

³ LLC «Northern Research», Moscow

Введение

Задачи составления карт субмаринной криолитозоны Российской Арктики и Северного полушария являются актуальными в связи с активизацией их геологического изучения, поисково-разведочными работами на углеводородное сырье и перспективами расширения транспортного использования арктических морей. На шельфе подавляющим распространением пользуются реликтовые многолетнемерзлые породы. Они формировались в холодные климатические и гляциоэвстатические циклы. Шельф морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в отношении тектоники, четвертичной геологии, мерзлоты исследован существенно хуже западного – Баренцево-Карского – сектора. Слабая обеспеченность восточного сектора геофизическими данными, отсутствие методик их интерпретации в геокриологических целях обуславливают решение указанных задач с помощью теплового математического моделирования. В основе указанной методики лежит решение задачи теплопроводности, которое предполагает составление палеогеографического сценария, геолого-тектонической модели, их тестирование, собственно моделирование и валидацию его результатов. Ниже рассматривается современная обеспеченность материалами для подобных исследований и картирования.

Обзор изученности. Согласно районированию по условиям формирования субмаринных мерзлых пород рассматриваемый шельф в отличие от ледникового Баренцево-Карского и приледникового моря Бофорта относится к перигляциальным шельфам [Гаврилов, 2008]. Это означает его глубокое промерзание в ледниковья и медленное оттаивание в межледниковья в основном снизу мерзлой толщи за счет теплового потока из недр.

Основные задачи картирования: 1) оценка распространения мерзлых толщ; 2) оценка мощности, вернее, глубины залегания подошвы мерзлоты и ее распределения по акватории; 3) оценка глубины залегания кровли мерзлоты и вертикального строения криолитозоны; 4) оценка распространения, глубины залегания кровли и подошвы зоны стабильности гидратов газов. Указанные задачи первоначально, начиная с конца 1960-х гг., решались с помощью расчетов и численного моделирования. В 1990-2000-е годы значительный объем данных был получен в результате 15-летних комплексных междисциплинарных немецко-российских морских исследований в море Лаптевых с применением сейсмоакустического эхолота-профилографа Парасаунд [Система..., 2009]. В настоящее время начинается использование сейсмических данных, полученных методом общей глубинной точки (МОГТ) [Богоявленский и др., 2020; 2021; 2022], и электромагнитных данных [Кошурников, 2023]. Они позволяют более определенно судить о распространении мерзлоты, о существовании и параметрах зоны гидратообразования.

Представления о распространении и мощности криолитозоны получены по данным бурения, геотермических наблюдений в скважинах, донного опробования и только в настоящее время - по данным МОГТ. В течение 70-летней истории изучения рассматриваемого шельфа было пробурено более 100 скважин [Григорьев Н.Ф., 1966; Жигарев, Плахт, 1974; Соловьев и др., 1987; Фартышев, 1993; Григорьев М.Н., 2008]. Однако, все они пройдены близ берега, не далее 5-10, максимум 30 км от него. Глубина бурения составляла в основном 50-70, максимально - 190-215 м. Ни одна из скважин не прошла криолитозону на всю ее мощность. На побережье континента скважин мало, они расположены в иных тектоно-седиментационных условиях и, в основном, также как на шельфе, не прошли криолитозону полностью. На Новосибирских островах представления о мощности мерзлоты еще менее определены. Ситуация усугубляется отсутствием надежных определений теплового потока и его распределения по акватории. Поэтому оценка мощности мерзлоты остается важнейшей проблемой до сих пор.

Результаты расчетов распространения и мощности субмаринной мерзлоты арктического шельфа, выполненные В.А. Соловьевым [1981] в 1970-80-х гг. как наиболее обоснованные в те годы, представлены в настоящее время на Геокриологической карте СССР [1997]. Согласно ей преимущественным распространением на шельфе Восточной Сибири пользуются островные и редкоостровные мерзлые породы мощностью до 200 м, а также охлажденные породы. Мерзлые породы сплошного распространения мощностью до 200 м и более окаймляют континент и острова.

Фундаментом, на котором построены современные представления о криолитозоне шельфа Восточной Сибири, явились исследования коллектива Н.Н. Романовского в 1997-2010 гг. Этим коллективом впервые в 2000 г. для составления палеотемпературного сценария было применено трансформирование изотопной кривой, полученной на антарктической станции «Восток» в палеотемпературную кривую указанного шельфа [Гаврилов и др., 2000]. Впервые также было предложено использование гляциоэвстатических кривых для составления моделей колебаний уровня моря и предложена методика корректировки этих кривых региональными данными. В период господства представлений о доминирующей роли термоабразии в послеледниковой трансгрессии моря коллективом был предложен неизвестный дотоле механизм ускорения хода трансгрессии – массовое озерно-термокарстовое преобразование рельефа шельфа [Романовский и др., 1999]. Предложенные представления позволили разработать модель послеледниковой трансгрессии моря на перигляциальных шельфах Арктики [Гаврилов и др., 2006], а также количественные методы учета роли термокарста в формировании вертикального строения криолитозоны и таликов [Тумской, 2002; Касымская, 2010].

Уже на рубеже XX и XXI вв. синтез результатов морских немецко-российских исследований по программе «Система моря Лаптевых» с региональными буровыми отечественными данными позволили сформировать новые представления о криолитозоне шельфа, согласно которым она представляет собой область со сплошным распространением мерзлых толщ от береговой линии до изобаты 60 м и прерывистым и островным их развитием в интервале глубин моря 60-120 м [Романовский и др., 1998; 2003]. Оценить валидность этих данных в 2000-е гг. было невозможно. В настоящее время это стало реальным: данные МОГТ свидетельствуют об отсутствии или островном распространении мерзлоты в море Лаптевых, начиная с изобат 50-60 м. В Восточно-Сибирском море подобные признаки наблюдаются даже на меньших глубинах моря [Богоявленский и др., 2020; 2021; 2022] (рис.1). Последующие работы большого числа авторов, дополнявших, детализировавших или изменявших наши исследования, приходили в целом к схожим выводам. Поэтому данные МОГТ подтверждают достоверность и их результатов в отношении распространения мерзлых толщ.

Выяснилось, что в пределах поднятия Де Лонга и его окружения плотность теплового потока варьирует от 66 до 123, при среднем значении 91 мВт/м² [Богоявленский и др., 2022]. Наши исследования, доложенные два года назад на Школе морской геологии, позволяют считать, что донные породы вне зон разломов в районе островов Де Лонга, где море вскрывается всего примерно на один месяц, могут характеризоваться талым состоянием.

Использование для валидации модельной мощности мерзлоты данных бурения на континентальном побережье позволило оценить ее максимальные значения (при плотности теплового потока в рифтах 75, а в межрифтовых горстах - 60 мВт/м²) как соответствующие 500-600 м у континента, 700 м севернее Новосибирских островов [Романовский и др., 2003]. При этом в рифтах прогнозируемая мощность мерзлоты дана как изменяющаяся от 100 до 300 м, что связано также с существованием субмаринных надмерзлотных таликов, наследующих подозерные талики, возникшие еще до затопления морем [Гаврилов, 2008].

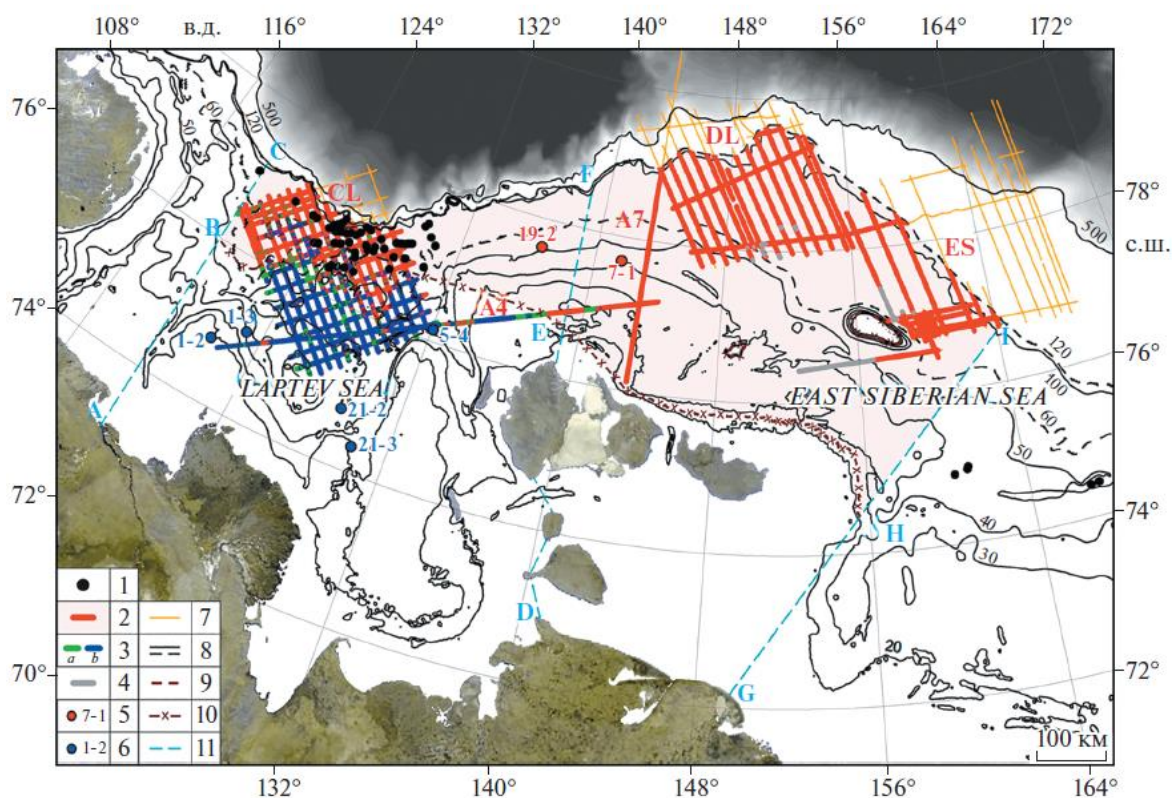


Рис. 1. Фактические данные и зона островного развития мерзлых пород по результатам сейсмического профилирования на шельфе морей Лаптевых и Восточно-Сибирского

[Богоявленский и др., 2022]: 1 – сипы газа; 2 и 3 – отсутствие (2) и наличие (3) сейсмических свидетельств существования мерзлых пород; 4 – сейсмические волны неясного генезиса; 5 и 6 – отсутствие (5) и наличие (6) мерзлых пород по данным донных сейсмостанций; 7 – сейсмопрофили на глубинах моря свыше 120 м; 8 – изобаты, м; 9 и 10 – прогнозируемые границы распространения мерзлых пород: 9 – уверенные; 10 – требующие дополнительных исследований; 11 – границы исследуемого шельфа.

Сведения о глубине залегания кровли мерзлоты и вертикальном строении криолитозоны

Опорными при оценке глубин залегания кровли мерзлоты являлись данные геотермических наблюдений в скважинах, замеры температуры придонной воды и донный пробоотбор. Невозможность встать на якорь на мелководьях во время плаваний в средние века явилось одним из ранних свидетельств существования мерзлоты в морях Лаптевых и Восточно-Сибирского. Однако уже в 1970-е годы стало ясно, что участков с заглубленной кровлей мерзлоты существенно больше, чем участков мерзлого дна. Отбор донных проб с помощью вибропоршневой трубки во внешней части Эбеляхской губы показал, что заглубления кровли составляют 70, а мерзлое дно - 30% от суммарного количества мест отбора [Молочушкин, 1973]. Участки мерзлого дна оказались сложенными незасоленными породами – останцами отложений ледового комплекса позднего неоплейстоцена. Морские исследования 1990-2000 гг. на более значительных глубинах моря показали полное преобладание мест с заглублением кровли мерзлоты [Арэ, 2016].

Большое количество скважин дает возможность составить представление о глубине залегания кровли мерзлоты не только в прибрежной полосе (глубины моря до 15-20 м), но и на большей части шельфа. Так, в проливе Дм. Лаптева заглубление кровли мерзлоты изменяется от 10 до 20, а на двух участках – до 40 м [Фартышев, 1993]. В проливе Санникова ни одна из 6 скважин глубиной до 70 м не вскрыла мерзлых пород. Однако наличие посткриогенных текстур в отложениях свидетельствуют об их прежнем существовании [Фартышев, 1993]. Наиболее глубокое залегание реликтовых мерзлых пород - 83 м - зафиксировано бурением Н.Ф. Григорьева на входном баре в Ванькину губу [Данилов, Жигарев, 1977].

Сейсмоакустические данные способны выявлять различия в состоянии пород (талого или мерзлого) как в вертикальном разрезе, так и по латерали. По данным моделирования состояния толщ мерзлых пород на шельфе Восточной Сибири, деградирующих под морем уже многие тысячелетия, весь разрез находится в диапазоне температур, близком к 0°C [Романовский и др., 2001]. Поэтому с помощью сейсмоакустических материалов можно выделять как тонкодисперсные отложения, которые находятся в твердо-мерзлом или в пластично-мерзлом состояниях, так и насыщенные соленой водой грубо-дисперсные и полускальные породы. Различия в состоянии пород могут быть связаны не только с литологией, но также с тепловым или механическим воздействием, т.е. с воздействием различных мерзлотно-геологических процессов. Но в то же время, чем ближе температура к 0°C, тем серьезнее затруднения с интерпретацией сейсмических материалов.

Изучение геологических процессов и явлений. Возможность такого изучения демонстрирует фиксация на сейсмоакустических материалах палеотермокарстовых котловин и их строения (рис.2).

Прерывистость мерзлых толщ может фиксироваться по результатам применения электроразведочных методов. Под Хатангском заливом и акваторией бухты Нордвик в ходе региональных электроразведочных работ методами магнитотеллурического зондирования и зондирования становлением поля Д.В. Яковлевым и др. [2018] выявлено существование талых пород, прослеживаемое на глубину более 1,5 км. По всей видимости, это сквозной

талик. Причиной его существования является, скорее всего, эстуарный характер устьевой зоны р. Хатанги. Эти данные коррелируют с данными об отсутствии мерзлоты в эстуариях Оби и Таза. В других местах указанных водоемов развиты мерзлые породы. Их кровля заглублена на 250 м, такую же величину имеет мощность мерзлоты. На авандельтах мощность водного речного потока и его отепляющая роль в условиях шельфа Восточной Сибири не столь велики. В этих случаях, как и в периферийных частях Хатангского эстуария формируется только лишь несквозной надмерзлотный талик.

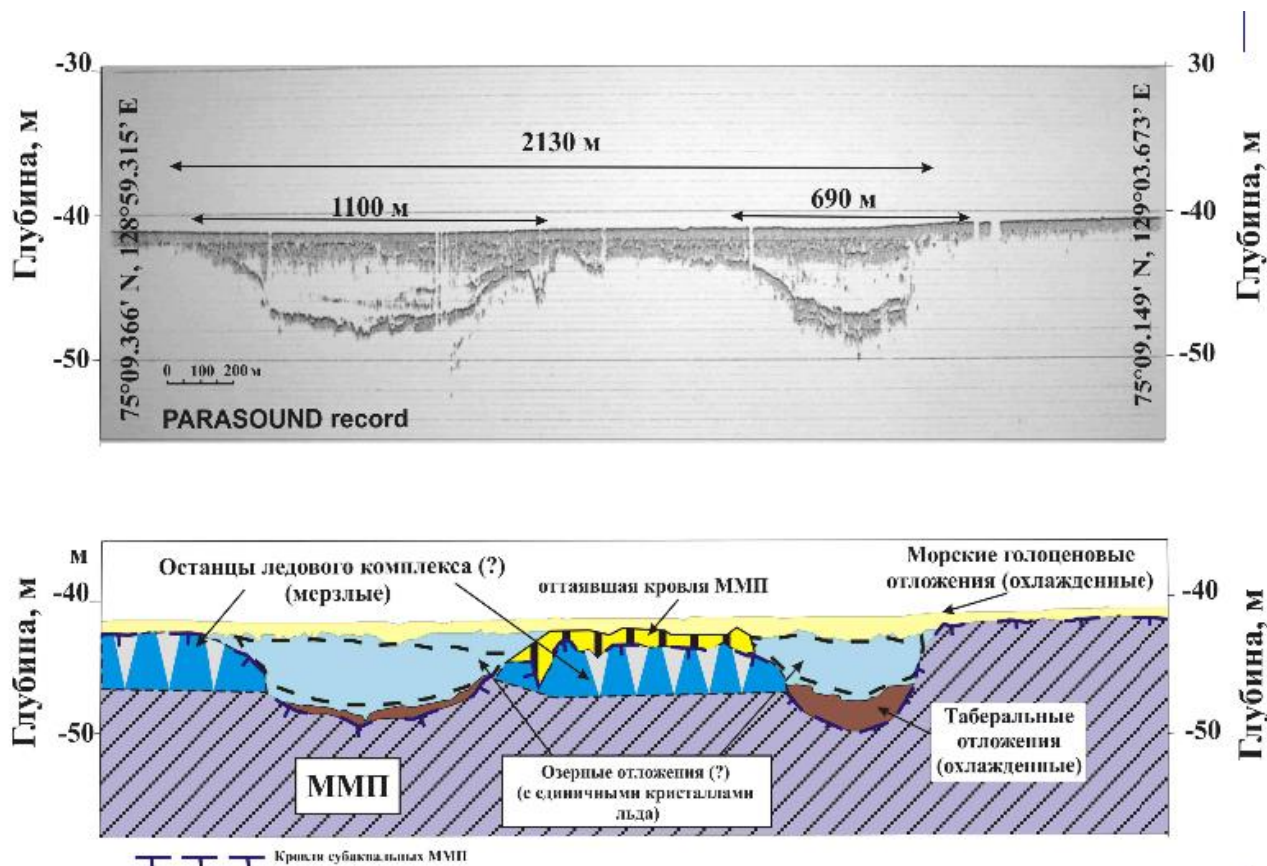


Рис. 2. Пример сейсмоакустических данных Parasound и их мерзлотно-геологическая интерпретация [Касымская 2012]. ММП – многолетнемерзлые породы.

Информация о зоне гидратообразования

А.В. Кошурниковым [2020] предложен и апробирован ряд других электроразведочных методов. Это методы зондирования становлением поля и малоглубинные частотные зондирования для изучения ММП на шельфе и в зоне суша-шельф соответственно. Им они осуществлялись в морском варианте с научно-исследовательских судов. А.В. Кошурниковым выделяются криогенногидратные толщи. Это мерзлые породы, смыкающиеся с толщей пород, сцементированных гидратами. На шельфе морей восточного сектора Российской Арктики их общая мощность достигает 1170 м (залив Буорхая), Распространение криогенногидратных толщ коррелируется с известными газогидратными областями Северного Ледовитого океана.

Выводы

1. Фактологическая база данных о мерзлых породах морей Лаптевых и Восточно-Сибирского в последнее время пополнилась принципиально новыми важными

сведениями об их распространении на севере шельфа. Эти сведения подтверждают наши модели 15-20 летней давности, во многом экспериментальные, как валидные.

2. Важно, что новые данные получены также и по другим частям шельфа, и это геофизические данные. Т.е. методика использования сейсмических и электроразведочных данных, немногочисленных до сих пор, развивается.
3. Современный этап исследований реликтовой шельфовой мерзлой толщи характеризуется как принципиально новый. Новизна заключается в том, что для оценки валидности их результатов почти всегда есть возможность найти необходимые для этого данные.

Список литературы:

1. Арэ Ф.Э. Разрушение берегов арктических приморских низменностей. Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 2012, 291 с.
2. Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 500, № 1. С. 70-76.
3. Богоявленский В. И., Кишанков В.И., Казанин А.Г. Мерзлота и газогидраты на арктическом шельфе Восточной Сибири // ДАН. Науки и Земле, 2022, т. 507, № 1, с. 110-117.
4. Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Романовский Н.Н. Реконструкция динамики среднегодовых температур пород на приморских низменностях Якутии и арктическом шельфе за последние 420 тыс. лет // Криосфера Земли, 2000, т. IV, №4, с. 3-14.
5. Гаврилов А.В. Типизация арктических шельфов по условиям формирования мерзлых толщ // Криосфера Земли, 2008, т. XII, № 3, с. 69-79.
6. Гаврилов А.В. Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири (современное состояние и история развития в среднем плейстоцене – голоцене). Автореф.... д.г.-м.н. М., 2008, 48 с.
7. Геокриологическая карта СССР, м-б 1:2 500 000 (Ред. Э.Д. Ершов). Картпредприятие, Винница. Украина. 1997. 16 листов.
8. Григорьев М.Н. Криоморфогенез и литодинамика прибрежно-шельфовой зоны морей Восточной Сибири. Автореф. дис...д.г.н., Якутск, 2008, 39 с.
9. Григорьев Н.Ф. Многолетнемерзлые породы Приморской зоны Якутии // М., Наука, 1966, 180с.
10. Данилов И.Д., Жигарев Л.А. Некоторые аспекты морской криологии арктической литорально-шельфовой зоны // Географические проблемы изучения Севера. М., Изд-во МГУ, 1977, с. 115-135.
11. Жигарев Л.А., Плахт И.Р. Особенности строения, распространения и формирования субаквальной криогенной толщи // Проблемы криолитологии, вып. IV, М., Изд-во МГУ, 1974, с. 115-124.

12. Касымская М.В. Реликтовый термокарстовый рельеф и талики восточной части шельфа моря Лаптевых. Автореф. дис. канд. геол.-мин. наук, М., 2010, 26 с.
13. Кошурников А.В. Многолетнемерзлые толщи шельфа морей Российской Арктики (по данным геофизических исследований). Автореф. дисс. д.г.-м.н., М., 2023, 45 с.
14. Молочушкин Е.Н. Влияние термоабразии на температуру многолетнемерзлых пород в прибрежной зоне моря Лаптевых // Тр. II Междунар. конф. по мерзлотоведению, вып.2, Якутск. 1973, с. 52-57.
15. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е., Григорьев М.Н., Хуббертен Х.В., Зигерт К. Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 3, с. 79 – 91.
16. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Пустовойт Г.В., Холодов А.Л., Кассенс Х., Хуббертен Х.-И., Ниссен Ф. Распространение субмариной мерзлоты на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли, т. 1, № 3, 1997, с. 9-18.
17. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Холодов А.Л., Типенко Г.С. Состояние толщ многолетнемерзлых пород на шельфе морей восточного сектора Российской Арктики // Криосфера Земли, 2001, т. V, № 2, с. 3-10.
18. Романовский Н.Н., Хуббертен Х.В., Гаврилов А.В., Елисеева А.А., Типенко Г.С., Холодов А.Л., Романовский В.Е. Эволюция мерзлых толщ и зоны стабильности гидратов газов в среднем плейстоцене-голоцене на шельфе восточной части евразийской Арктики // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 51-64.
19. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики. Современное состояние и история развития. Под ред. Кассенс, Лисицын, Тиде, Полякова, Тимохов, Фролов. М. Изд-во МГУ, 2009, 608 с.
20. 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.
21. Соловьев В.А., Гинсбург Г.Д., Телепнев Е.В., Михалюк Ю.Н. Криогеотермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: ПГО Севморгеология, 1987, 151с.
22. Фартышев А.И. Особенности прибрежно-шельфовой криолитозоны моря Лаптевых. Новосибирск: Наука, 1993, 135 с.
23. Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Валясина О.А. Изучение криолитозоны северного обрамления Сибирской платформы по данным электроразведочных работ // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 77-95.

УДК 528.88:551.435.52:551.351

Рубрика 38.47.00

МОРФОЛИТОГЕНЕЗ И ОБРАЗОВАНИЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ НА ШЕЛЬФЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ (ПО КОСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ)

MORPHOLITHOGENESIS AND FORMATION OF WEDGE ICES ON THE ARCTIC SEA SHELF (BASED ON SPACE DATA)

Гаврилов Анатолий Васильевич, Пижанкова Елена Ивановна

МГУ им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва

Gavrilov Anatoly Vasilievich, Pizhankova Elena Ivanovna

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow

Введение

Морфолитогенез, как показывают результаты дешифрирования космических снимков субметрового разрешения, по которым создано глобальное покрытие World Imagery [<https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>], широко развит на шельфе арктических морей. Он сопровождается промерзанием пород [Гаврилов, Пижанкова, 2021]. На севере субэдральной криолитозоны в условиях континентального климата ему свойственно криогенное растрескивание отложений с формированием полигонального микрорельефа и повторно-жильных льдов (ПЖЛ). Этот процесс является одним из самых распространенных. По наличию псевдоморфоз по вытаявшим ПЖЛ в разрезах и проявлению полигонального микрорельефа на поверхности и аэрофотоснимках установлено широкое распространение мерзлоты в неоплейстоценовые криохроны в перигляциальных областях Евразии и Северной Америки. Однако о развитии ПЖЛ в голоцене в прибрежно-морских обстановках информации нет. Ведь криогенное растрескивание здесь по-преимуществу должно осуществляться в засоленных прибрежно-морских отложениях. Целью настоящего сообщения является выявление местоположения участков современных (голоценовых) проявлений указанного процесса в прибрежно-морских условиях и закономерностей их распространения на арктическом шельфе.

Основные факторы, определяющие развитие криогенного растрескивания

Криогенное растрескивание определяется величиной максимальных за год градиентов температуры на поверхности и в слое сезонного оттаивания или промерзания пород. Важную роль играют также расстояние до ближайшей вертикальной поверхности (уступ поверхности), модуль упругости пород при сдвиге, коэффициент линейного температурного сжатия [Достовалов, 1952; 1960] и реологические свойства [Lachenbruch, 1962; Гречищев, 1970]. Необходимым для понимания процесса растрескивания является его связь с короткопериодными зимними температурными колебаниями (несколько суток) и отставание растрескивания от изменений температуры [Гречищев, 1970; 1973].

Н.Н. Романовский [1977] установил взаимосвязь криогенного растрескивания со среднемноголетней температурой пород, ее годовой амплитудой, составом и влажностью

пород. 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. Северный вариант растрескивания, сопровождающийся проникновением трещины непосредственно в мерзлую толщу и образованием в ней льда по Н.Н. Романовскому [1977], обеспечивается следующими температурными условиями. В пылеватых суглинках и супесях формирование ПЖЛ или грунтово-ледяных жил становится возможным при среднемноголетних геотемпературах не выше $-2...-4^{\circ}\text{C}$. В пресных песках подобная возможность реализуется при температурах -5 и ниже; в пресных малольдистых гравийно-галечных (дресвяно-щебенчатых) отложениях – при температурах не выше $-8...-9^{\circ}\text{C}$.

Выводы Н.Н. Романовского [1977] о связи растрескивания со средними значениями среднемноголетней температуры пород и годовой амплитуды их колебаний критиковались Н.В. Тумель [1979]. Ссылаясь на работы [Гречищев, 1973; Маскау, 1974; Подборный, 1978], она считала, что растрескивание, глубина проникновения трещин и ледяных жил, размеры полигональной решетки, определяются, главным образом, суточными изменениями температур. Однако, значение работы Н.Н. Романовского [1977] заключается в том, что она позволяет прогнозировать повторно-жильное льдообразование в связи со средними значениями этих температурных параметров.

Прибрежно-морским и лагунным условиям свойственны высокое засоление осадков и большая минерализация текстурных льдов. Для первой морской террасы р. Колымы содержание солей в осадках и льдах согласно данным В.Н. Зайцева [1976] достигает 2 % и 4,5 г/л соответственно. Низовья Колымы явились одним из основных опорных участков для установления закономерностей распространения голоценовых ПЖЛ в прибрежно-морских осадках изучаемого региона. Здесь выявлено, что ПЖЛ начинают формироваться при среднемноголетней температуре -11°C , а в незасоленных – при -2°C . И это в наиболее благоприятных для растрескивания условиях – континентальном типе сезонно-талого слоя (СТС), представленного сильновлажными оторфованными суглинками, супесями или торфом. Размер полигональной решетки в засоленных прибрежно-морских отложениях низовий Колымы достигает 70-100 м [Зайцев, 1976], тогда как в незасоленных варьирует от 12 до 25 м.

Материалы

Для исследований использовались глобальное покрытие World Imagery, созданное по синтезированному космическим снимкам (КС) с пространственным разрешением в панхроматическом варианте 0,3–1,7 м, полученным со спутников GeoEye, WorldView-2,4 за последние годы (2010–2020) с привлечением картографических, литературных данных и метеорологических обобщений.

Методика

Изучение закономерностей развития повторно-жильного льдообразования предполагает установление его зависимости от параметров СТС: среднемноголетней температуры пород, годовой амплитуды колебаний температур на их поверхности, состава и влажности отложений. Однако характеристика перечисленных параметров возможна только при производстве наземных мерзлотных исследований. Поэтому в основе подхода к настоящему исследованию лежала их замена параметрами, которые можно получить из климатических справочников, топографических и литологических карт из комплектов геологических карт масштаба 1:1 000 000 или непосредственно из материалов космических съемок. Так, сведения о температурных параметрах СТС заменялись данными о соответствующих

параметрах приземного воздуха: о среднемноголетней температуре воздуха (T_B) и годовой амплитуде колебаний температур воздуха (A_B). Источником данных явился Атлас Северного Ледовитого океана (рис. 1) [Атлас океанов, 1980].

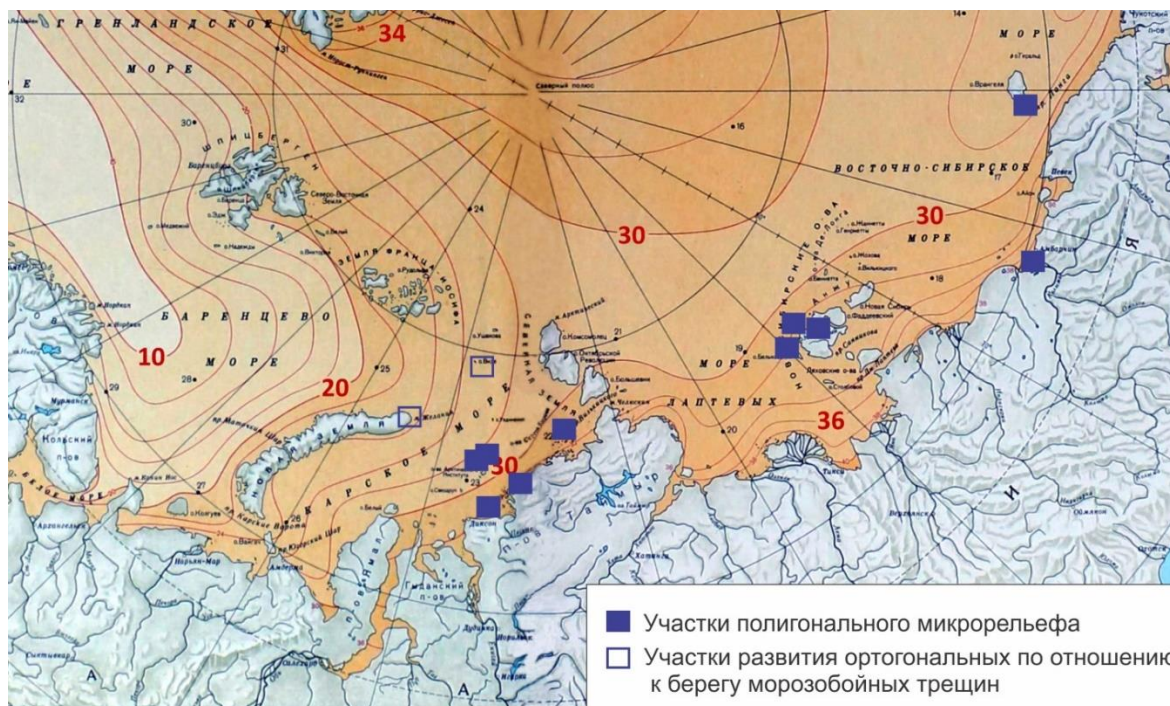


Рис. 1. Карта-схема расположения участков полигонального микрорельефа на формах голоценовой аккумуляции.

Для получения информации о составе и влажности пород топографические (м-б 1: 200 000) и литологические карты оказались непригодными, поскольку их масштаб слишком мелкий для такого рода сведений. Напротив, весьма полную информацию о ландшафтной структуре и мезорельефе территории, местоположении участков полигонального микрорельефа, фациальных условиях его формирования предоставляет покрытие WorldImagery. По величине полигонов и четкости прорисовки межполигональных понижений голоценовое повторно-жильное льдообразование надежно отделяется от позднеоплейстоценового. В частности, спутниковое покрытие позволяет выделять валиковые полигоны, отделять их от безваликовых. Непосредственно читаемая на космических материалах обводненность поверхности дает возможность судить о составе и влажности отложений, вмещающих ПЖЛ.

Результаты исследований вопреки выводам работы Н.В. Тумель [1979], показывают тесную связь полигонального микрорельефа с параметрами T_B , A_B и внутренними частями голоценовых лагун, фациальные условия которых (тонкодисперсный состав отложений, повышенная обводненность) в наибольшей степени благоприятствуют криогенному трещинообразованию и образованию ПЖЛ (рис. 2). Граничными значениями T_B являются минус $-11,5...-12^{\circ}\text{C}$, а таковыми для A_B – 28°C . На Евразийском шельфе это участки в интервале от 82°в.д. (о-ва Известий ЦИК) до 178°в.д. (юго-западная оконечность о. Врангеля). На Северо-Американском шельфе нами обнаружено место с ПЖЛ восточнее м. Барроу. При значениях $T_B = -11^{\circ}\text{C}$ и $A_B = 27^{\circ}\text{C}$ (северо-запад о. Визе) образуются только трещины. Последние формируются также в менее благоприятных, нежели лагуны, мерзлотно-фациальных условиях. Так, на морской террасе м. Барроу при не самой низкой

температуре ($T_B = -12^\circ\text{C}$) и значительной амплитуде колебаний температур ($A_B = 32^\circ\text{C}$) формируются только трещины, отстоящие друг от друга от 70 до 110 м.

Однако результаты исследований показывают: проявлений развития ПЖЛ очень немного. Основным ограничивающим фактором в северо-восточной части Карского шельфа является рельеф и скальные породы островов. Острова, проливы, берега континента здесь – это всё практически неизменные со времени последнего криохрона элементы горного рельефа, затопленного в ходе последней трансгрессии моря.

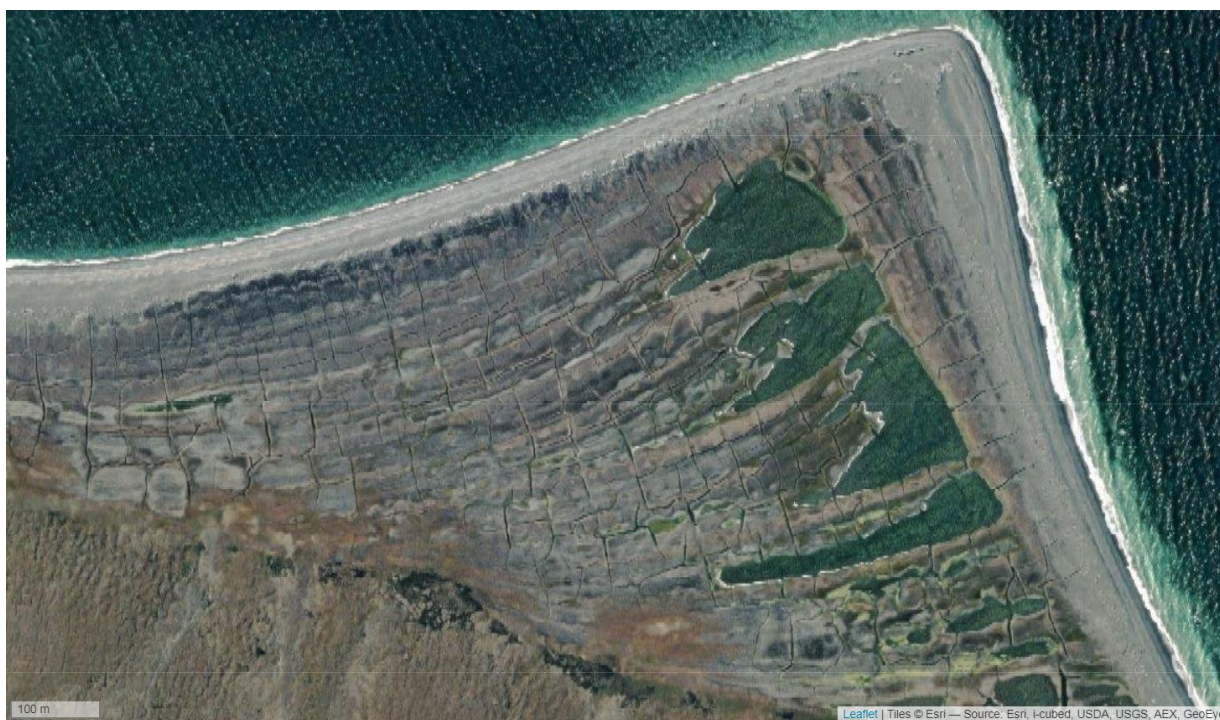


Рис. 2. ПЖЛ, формирующиеся в процессе осадконакопления в лагуне о. Пологий-Сергеева (острова Известий ЦИК), $T_B = -12^\circ\text{C}$, $A_B = 30^\circ\text{C}$.

В пределах голоценовых (современных) аккумулятивных форм Новосибирских островов лишь на самом севере о-вов Котельный и Бельковский (76°с.ш.) распространено формирование ПЖЛ, так как южнее лагуны не развиты. Их образование связано с деятельностью морских льдов, а сферой наибольшей активности льдов до современного потепления являлся интервал $75-80^\circ\text{с.ш.}$ [Гаврилов, Пижанкова, 2022]. По этой же причине мало участков ПЖЛ на северо-Американском шельфе.

Выводы

1. Выяснено, что арктическому шельфу, несмотря на существенную океанизацию климата, свойственны условия для развития процессов криогенного растрескивания засоленных прибрежно-морских отложений и формирования повторно-жильных льдов.
2. Выявление и картирование растрескивания и участков развития ПЖЛ должно осуществляться с помощью космических материалов субметрового разрешения (ресурс <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>). Он обладает способностью отображать различные виды полигонального микрорельефа и фациальных условий формирования синкриогенных осадков и парагенетически связанных с ними повторно-жильных льдов.

3. Выяснено, что ПЖЛ на шельфе могут формироваться в диапазоне среднемноголетних температур воздуха $-11\dots-16^{\circ}\text{C}$, и годовых амплитуд температур $28-39^{\circ}\text{C}$ в обводненных тонкодисперсных осадках и отложениях вне зон волнений. Фациально это почти повсеместно заполняющиеся осадками внутренние части лагун.

Список литературы:

1. Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. Л., 1980.
2. Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И. Роль криогенных процессов в осадконакоплении на мелководьях моря Лаптевых // Вестник Московского ун-та, сер. 4. Геология, 2020, № 6, с. 95-102.
3. Гаврилов А.В., Пижанкова Е.И. Особенности происхождения берегов Таймырского региона (по спутниковым данным) // Сборник материалов 20-й Международной конференции Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — XX.G.239.
4. Гречищев С.Е. К основам методики прогноза температурных напряжений и деформаций в мерзлых грунтах. М., 1970.
5. Гречищев С.Е. Основные закономерности термореологии и температурного растрескивания мерзлых грунтов // II Международная конф. по мерзлотовед., Якутск, 1973, Вып. 4.
6. Достовалов Б.Н. О физических условиях образования морозобойных трещин и развития трещинных льдов рыхлых пород // Исследование вечной мерзлоты в Якутской республике, вып. 3. М., Изд-во АН СССР, 1952, с. 162-194.
7. Достовалов Б.Н. Закономерности развития тетрагональных систем ледяных и грунтовых жил в дисперсных породах // Перигляциальные явления на территории СССР. М., Изд-во МГУ, 1960, с. 37-65.
8. 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.
9. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, 215 с.
10. Тумель Н.В. Температурный режим мерзлых пород и морозобойное растрескивание // Проблемы криолитологии, вып. VIII, М., Изд-во МГУ, 1979, с. 26-49.
11. Lachenbruch A. Mechanics of thermal contraction cracks and ice-wedge polygons in permafrost. Geol. Soc. Amer., 1962.
12. <https://bestmaps.ru/map/esri/sat/>

УДК 553.3.072

Рубрика 38.49.19

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПОЛЕЙ КОРАЛЛОВОЕ И МОЛОДЁЖНОЕ (СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ ХРЕБЕТ)

GEOLOGICAL SETTINGS AND COMPOSITION FEATURES OF THE HYDROTHERMAL FIELDS KORALLOVOJE AND MOLODEJNOJE (MID-ATLANTIC RIDGE)

Мусатов Алексей Евгеньевич¹, Козлов Сергей Александрович², Маковиз Арсений Михайлович³

¹ ООО Удоканская медь, Удокан

² АО "Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция" (ПМГРЭ), Санкт-Петербург

³ ФГБУ "Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского", Санкт-Петербург

Musatov Alexey Evgenievich¹, Kozlov Sergey Alexandrovich², Makoviz Arseny Mikhailovich³

¹ LLC Udokan Copper, Udokan

² SV Polar Marine Geosurvey Expedition, St.Petersburg

³ A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, St.Petersburg

Введение

В ходе 41-ого рейса НИС "Профессор Логачев (2019-2020 гг.) в Российском Разведочном районе (далее - РРР) специалистами АО «ПМГРЭ» (АО «Росгеология») открыты два новых гидротермальных поля – «Коралловое» и «Молодежное» (Маковиз и др., 2023). Поля расположены в южной части сегмента Срединно-Атлантического хребта (далее САХ) и приурочены к западному борту рифтовой долины в пределах крупного массива габбро-перидотитов (рис. 1).

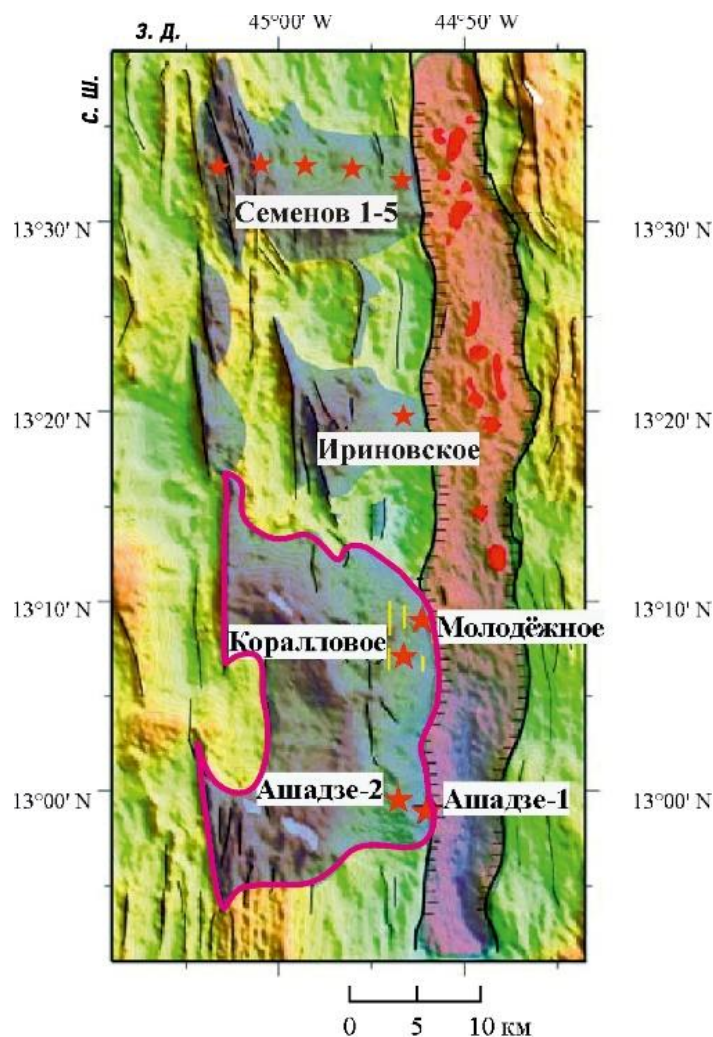


Рис. 1. Расположение гидротермальных полей «Коралловое» и «Молодежное» на участке САХ в пределах крупного габбро-перидотитового массива (красный контур). Серым цветом отмечены массивы габбро-перидотитовых пород (внутренние океанические комплексы), от светло-красного до фиолетового – днище рифтовой долины разной глубины залегания, ярко-красным – неовулканические поднятия, черной линией с отметками – граница днища рифтовой долины, звездами – гидротермальные рудные поля, желтыми штрихами – аномалии ЕП в районе новых гидротермальных полей (Smith D.K et al., 2008, с дополнениями).

Гидротермальные образования полей представлены массивными сульфидными рудами, прожилково-вкрапленным сульфидным оруденением, железомарганцевыми корками и металлоносными осадками. Гидротермальные рудные поля «Коралловое» и «Молодежное» расположены в южной части сегмента Срединно-Атлантического хребта, расположенного между трансформными разломами Зеленого Мыса и Марафон. Рифтовая долина на данном участке САХ отличается узким (2 км) и глубоким (4600–4900 м) дном с высокими склонами бортов. Восточный борт долины сложен преимущественно базальтами, на западном борту установлены несколько выходов глубинных габбро-перидотитовых пород. Поля «Коралловое» и «Молодежное» вместе с рудным узлом «Ашадзе» приурочены к самому крупному массиву габбро-перидотитов.

Выходы глубинных пород габбро-перидотитовой ассоциации в пределах срединно-океанических хребтов связывают с внутренними океаническими комплексами (ВОК), в пределах которых отмечены многочисленные проявления высокотемпературной гидротермальной деятельности и сульфидного оруденения (Escartin et al., 2008, Fouquet et al., 2010, German et al., 2016, Smith et al., 2006). Ранее в южной части того же массива были открыты гидротермальные рудные поля “Ашадзе-1” и “Ашадзе-2” (Черкашёв и др., 2013). Поле «Коралловое» расположено в срединной части борта рифтовой долины и залегает на пологом участке склона в интервале глубин 2800–2850 м. За центр поля приняты координаты 13°07.2' с.ш. и 44°53.8' з.д. При проведении телевизионной съемки в пределах поля “Коралловое” наблюдался дым черного курильщика. Поле Молодёжное расположено на расстоянии около 5 км к северо-востоку от поля “Коралловое”. Поле залегает на менее крутом участке склона в интервале глубин 3500–3550 м. За центр поля приняты координаты 13°09.4' с.ш. и 44°52.1' з.д.

Целью данного исследования является типизация геологического строения полей и вещественного состава гидротермальных образований полей «Коралловое» и «Молодёжное», с выявлением закономерностей размещения руд и вмещающих горных пород.

Методы

В 2019–2020 гг. в 41-ом рейсе НИС “Профессор Логачев” были изучены блоки РРР на отрезке САХ 20°01'–20°54' с.ш. Работы проводились по отработанной в рейсах АО “ПМГРЭ” методике, включающей следующие виды работ и инструменты:

- гидролокационное профилирование с электроразведочным модулем (комплекс ГБО “МАК-1М-ЕП” с одновременным измерением потенциала естественного электрического поля (ЕП);
- телевизионное профилирование (комплекс TVS Sperre)
- геологическое опробование (скальная драга, коробчатый пробоотборник);
- гидрофизическое зондирование (зонд SBE 911 plus);
- привязка аппаратов (система подводной навигации HiRAP-101).

В качестве батиметрической основы использовались материалы многолучевой батиметрической съемки масштаба 1: 200000, выполненная ГНЦ ФГУГП “Южморгеология” в 2006 году. Минеральный состав поднятых гидротермальных образований исследовался методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре D2 Phaser фирмы Bruker в центре физики наногетероструктур Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН. Химический состав гидротермальных образований исследовался в лаборатории Физических и химических методов исследования минерального вещества (центр коллективного пользования “Геоаналитик”) Института геологии и геохимии УрО РАН методом рентгенофлуоресцентного спектрального анализа на следующие компоненты: Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, S, CaO, MnO, Fe₂O₃, Cu, Zn на спектрометре СРМ-35.

Результаты и обсуждение

По результатам подводного телепрофилирования в пределах гидротермального поля “Коралловое” выявлены три рудных тела (рис. 2)

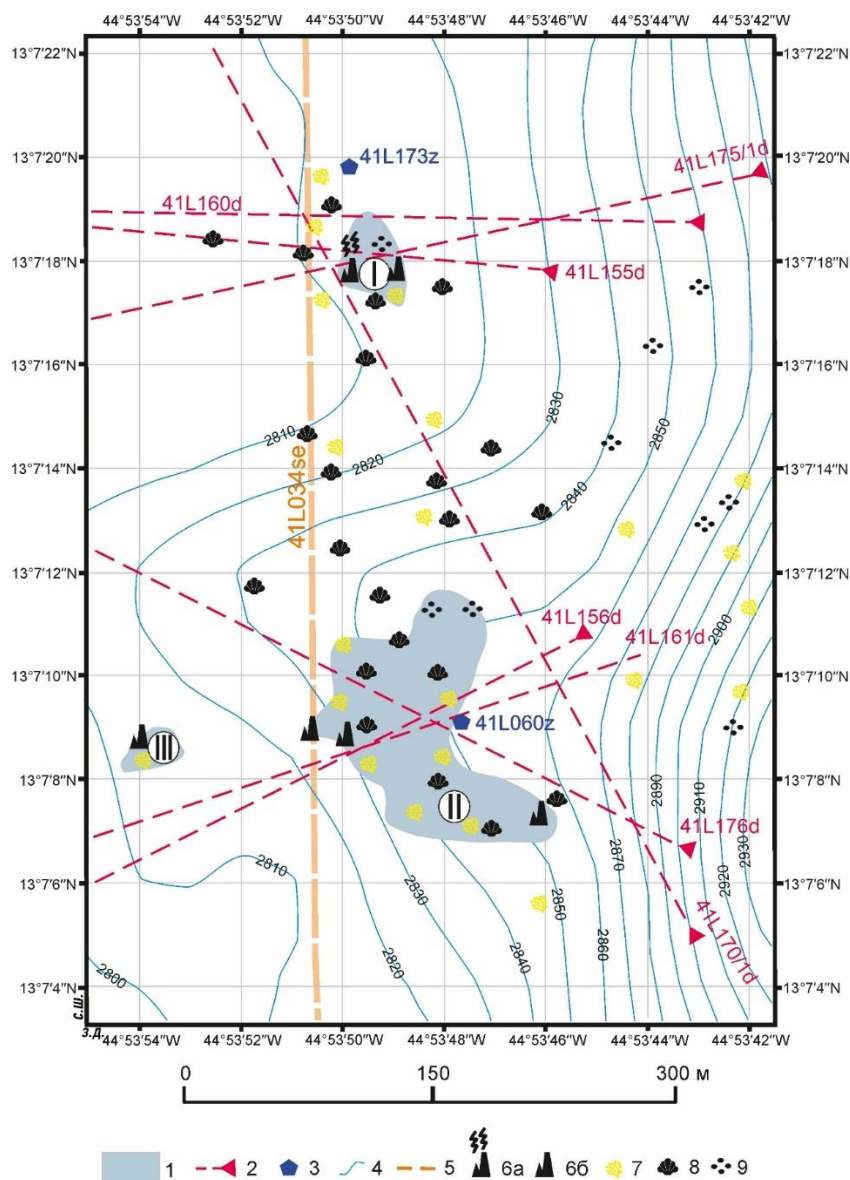


Рис. 2. Схема строения гидротермального рудного поля «Коралловое»: 1 – рудные тела и их номера (римские цифры), 2 – станции драгирования, 3 – гидрологические станции, 4 – изобаты (через 10 м), 5 – фрагмент профиля с выделенной аномалией ЕП, 6 – гидротермальные постройки: активные (а) и неактивные (б), 7 – металлоносные осадки, 8 – раковины моллюсков, 9 – гидротермальные корки (Маковиз и др., 2023).

При помощи скальной драги в пределах поля подняты пробы с прожилково-вкрапленным оруденением (станции 41L155d, 41L156d, 41L161d, 41L176d, 41L170/1d и 41L175/1d), обломки труб (станция 41L155d) и гидротермальные корки (станции 41L155d, 41L156d, 41L160d). В драгах также встречались обломки серпентинизированных габбро-перидотитов и базальтов. Фрагменты труб гидротермальных построек имеют концентрически-зональное строение, которое осложнено побочными каналами, нарушающими общую зональность. В них выделяются 4 главных зоны, каждая из которых сложены преимущественно халькопиритом и борнитом. Каждая зона имеет чёткую границу и свои морфологические особенности. Внутренняя зона труб сложена рыхлыми синими и розоватыми сульфидами меди, иногда с вкрапленностью мелких кристаллов халькопирита и сфалерита. Сфалерит тяготеет к внешней части зоны, ближе к контакту со следующей халькопирит-борнитовой зоной. Халькопирит-

борнитовая зона сложена мелкозернистым минеральными агрегатами борнита и относительно крупными тетраэдрическими кристаллами халькопирита (до 0.3 мм), на поверхности минералов наблюдается побежалость вторичных сульфидов меди. Помимо относительно крупных кристаллов халькопирит также образует мелкозернистые минеральные агрегаты. На границе со следующей зоной наблюдаются редкие сростки пластинчатых кристаллов марказита, на поверхности которых развит черный налет. Следующая зона сложена сливным тонкозернистым борнитом с гнездами мелкозернистого халькопирита. Поверхность борнита покрыта синей и красновато-розоватой побежалостью сульфидов меди. Внешняя зона сложена мелкозернистым халькопиритом, борнитом и опалом. Опал образуется в кавернах и порах, и его количество увеличивается к внешней части трубы, а количество сульфидов наоборот уменьшается (Маковиз и др., 2023). Строение труб осложнено побочными каналами, которые нарушают общую зональность.

Сульфиды с прожилково-вкрапленном оруденением представлены в основном халькопирит-борнитовым и, в меньшей степени, пиритовым типами. Также в части образцов присутствуют халькопирит-борнит-пирротиновая и пирит-халькопиритовая вкрапленность. В среднем по всем изученным образцам вкрапленность составляет 4–5%. Вмещающие породы представлены преимущественно тальковыми, тальк-хлоритовыми и тальк-опаловыми разновидностями серпентинизированных габбро-перидотитов. Гидротермальные корки сложены гидроксидами железа и марганца и имеют слоистое строение с кремнисто-железистыми прожилками, также в корках уставлены реликты оталькованных пород.

По результатам подводного телепрофилирования и отбора донно-каменного материала в пределах гидротермального поля "Молодёжное" установлено одно рудное тело (рис. 3).

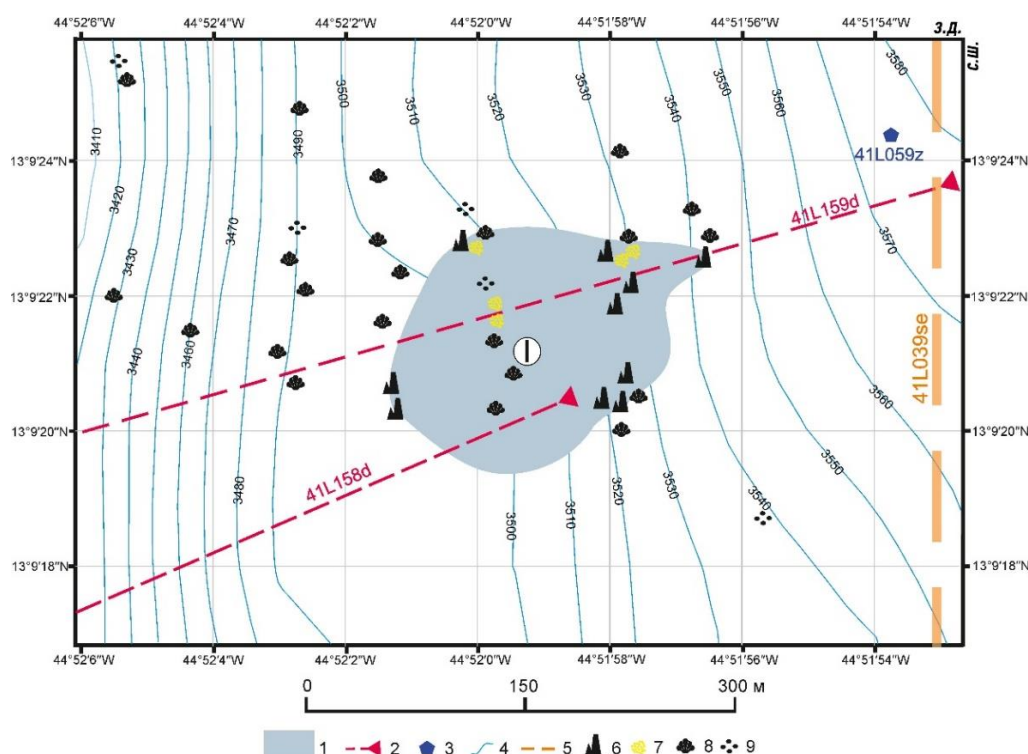


Рис. 3. Схема строение рудного поля Молодёжное, условные обозначения см. на рис. 2. (Маковиз и др., 2023).

При помощи скальной драги в пределах поля подняты пробы с прожилково-вкрапленным оруденением и обломки труб. Фрагменты труб гидротермальных построек (станция 41L158d) сложены преимущественно халькопирит-борнитовыми рудами и имеют концентрически-зональное строение, но вместо четырех зон, как в трубах поля «Коралловое», в них наблюдаются три зоны: редуцированная внутренняя зона вокруг рудоподводящего канала, сложенная рыхлыми сульфидами меди, халькопирит-борнитовая и внешняя опал-сульфидная зоны. Внутренняя зона рыхлых сульфидов меди в трубах представлена тонкозернистыми минералами зеленоватого, черного и темно-синего цвета и халькопиритом, но в ряде образцов внутренняя зона может отсутствовать. Рыхлые сульфиды по данным РФА представлены преимущественно ковеллином, в единичных кристаллах встречаются кристаллы изокубанита. В халькопирит-борнитовой зоне образуются тетраэдрические кристаллы халькопирита размером до 2 мм; также встречаются натечные агрегаты халькопирита. Борнит образует мелкозернистые агрегаты, и его количество по направлению к внешней зоне постепенно возрастает. В халькопирит-борнитовой зоне также наблюдаются гнезда мелкозернистого сфалерита. Внешняя зона сложена преимущественно опалом и халькопиритом. Халькопирит образует мелкозернистые и редкие кристаллы тетрагонального габитуса. Опал образует глобулярные агрегаты, а также обрастает кристаллы халькопирита (Маковиз и др., 2023). Небольшие каналы труб часто не запечатаны и инкрустированы опалом. Прожилково-вкрапленное оруденение представлено пиритом в оталькованных серпентинитах (станция 41L159d). Рудная вкрапленность во вмещающих породах не превышает 1–2% и иногда образует гнездовые скопления. Гнездовые скопления представлены мелкозернистым пиритом.

Химический состав руд обоих полей преимущественно медно-цинковый, содержания кремнезема в рудах выше по сравнению с рудами, сформированными в пределах ультраосновных комплексов, а кальция в рудах содержится несколько ниже (Черкашев и др., 2018, Fouquet et al., 2010). Корки поля «Коралловое» по химическому составу представлены железомарганцевой специализацией с высокими содержаниями кремния и магния.

В пределах полей были подняты изменённые породы ультраосновного комплекса и базальты. Наличие базальтов указывает на то, что возможный источник тепла для гидротермальных систем двух полей был основной магматизм. Также в пределах обоих полей установлены многочисленные холмы высотой до 3 м (Маковиз и др., 2023). Данные формы рельефа сложены породами с прожилково-вкрапленным оруденением и на их поверхности установлены колонии двусторчатых моллюсков родов *Bathymodiolus* sp. и *Caliptogena* sp., что указывает на гидротермальную активность в пределах таких структур (Gage et al., 1991). При этом разгрузка гидротермального флюида происходила как на морском дне, так и в вмещающих породах. Такие формы рельефа могли сформироваться вследствие выхода базальтового магматизма. На влияние основного магматизма на формировании гидротермальных систем полей также указывает химический состав руд, который более характерен для руд (повышенное содержание кремнезема и пониженное кальция по сравнению с рудами в пределах габбро-перидотитов), связанных с базальтами (Fouquet et al., 2010).

Выводы

- Гидротермальные поля «Коралловое» и «Молодёжное» сформированы в пределах крупного массива габбро-перидотитов на расстоянии около 5 км друг от друга и сложены массивными сульфидными рудами, породами с прожилково-вкрапленным оруденением, металлоносными осадками и гидротермальными корками.
- Вещественный состав руд двух полей схож между собой и является нетипичным для руд, связанных с ультраосновными комплексами. По химическому составу руды больше схожи с рудами, формирование которых связано с основным магматизмом.

- По сравнению с другими гидротермальными полями в пределах PPP поля «Коралловое» и «Молодёжное» обладают уникальными особенностями: с одной стороны, руды полей сформировались в пределах габбро-перидотитовых комплексах, но не обладают всеми характерными особенностями для руд данного типа, с другой стороны имеются отличия и от полей, сформированных в пределах базальтов – в строении полей отсутствуют сульфидные холмы и марказит-пиритовые руды, характерные для таких руд (Fouquet et al., 2010). Еще одной отличительной особенностью рудных полей «Коралловое» и «Молодёжное» является обширное развитие руд прожилково-вкрапленной текстуры, приуроченных к холмистым формам рельефа, что не характерно для всех ранее изученных полей. По всей видимости, такое нетипичное строение и состав руд полей связан с базальтовым магматизмом, который происходил в непосредственной близости от полей.

Список литературы:

1. Маковиз А.М., Мусатов А.Е., Сергеева И.А. и др. Открытие новых гидротермальных рудных полей "Коралловое" и "Молодёжное" (13°09' с.ш.) в пределах Срединно-Атлантического хребта // *Океанология*, 2023, Т. 63, № 1, стр. 124-134.
2. Черкашев Г.А., Иванов В.Н., Бельтнев В.Е. и др. Сульфидные руды северной приэкваториальной части Срединно-Атлантического хребта // *Океанология*. 2013. Т. 53 № 5. С. 680–693.
3. Escartín J., Smith D.K., Cann J. et al. Central role of detachment faults in accretion of slow-spreading oceanic lithosphere // *Nature*. 2008. V. 455(7214). P. 790–794.
4. Fouquet Y., Cambon P., Etoubleau J. et al. Geodiversity of hydrothermal processes along the Mid-Atlantic Ridge and ultramafic hosted mineralization: a new type of oceanic Cu–Zn–Co–Au volcanogenic massive sulfide deposit // *Diversity of submarine hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges*. *Geophys. Monogr.* 2010. V. 188. P. 297–320.
5. Gage J., Tyler P. *Deep-Sea Biology: A Natural History of Organisms at the Deep-Sea Floor*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991. 520 p.
6. German C.R., Petersen S., Hannington M.D. Hydrothermal exploration of mid-ocean ridges: Where might the largest sulfide deposits be forming? // *Chemical Geology*. 2016. V. 420. P. 114–126. 9. MacLeod C.J., Searle R.C., Murton B.J. et al. Life cycle of oceanic core complexes // *Earth and Planetary Science Letters*. 2009. V. 287. P. 333–344. 10. Smith D.K., Escartín J., Schouten H. et al. Fault rotation and core complex formation: Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°–15° N) // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9 (3). P. 1–23. 11. Smith D.K., Cann J.R., Escartín J. Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13° N on the Mid-Atlantic Ridge // *Nature*. 2006. V. 442 (7101). P. 440–443.
7. Smith D.K., Escartín J., Schouten H. et al. Fault rotation and core complex formation: Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13°–15° N) // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9 (3). P. 1–23. 11.
8. Smith D.K., Cann J.R., Escartín J. Widespread active detachment faulting and core complex formation near 13° N on the Mid-Atlantic Ridge // *Nature*. 2006

УДК 550.8.028

Рубрика 38.63.53/36.33.27

**ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОНКРЕЦИЙ В ЗОНЕ КЛАРИОН-
КЛИППЕРТОН ТИХОГО ОКЕАНА В ПРЕДДВЕРИИ ИХ
ПРОМЫШЛЕННОЙ РАЗРАБОТКИ**

**PROBLEMS OF STUDYING THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT OF
FERROMANGANESE NODULE DEPOSITS IN THE CLARION-
CLIPPERTON ZONE OF THE PACIFIC OCEAN ON THE EVE OF THEIR
INDUSTRIAL DEVELOPMENT**

Захаров Михаил Сергеевич, Кондратенко Анатолий Владимирович

*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана им. И. С. Грамберга (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»)*

Zakharov Mikhail Sergeevich, Kondratenko Anatoly Vladimirovich

VNII OKEANGEOLOGIA

Введение

Интенсивное изучение глубоководных областей Мирового океана, и в частности, рудной провинции Клариион-Клиппертон в приэкваториальной части Тихого океана, связано с подготовкой различных стран и международных консорциумов, заключивших контракты с Международным органом по морскому дну, к промышленному освоению месторождений железомарганцевых конкреций (ЖМК), являющихся комплексной рудой для получения никеля, меди, кобальта, марганца и некоторых редкоземельных элементов.

Обзор выполненных исследований

Работы в этой провинции по данной проблеме начались в 80-ых годах прошлого столетия. За истекший период некоторые подрядчики выполнили большой объем планомерных исследований в своих разведочных районах и вплотную подошли к опытно-промышленной добыче конкреций. Лидеры этого процесса предполагают уже в 2028 году начать добычу конкреций на своих участках. Речь идет о запуске грандиозного международного проекта по созданию нового вида промышленного производства, начиная от сбора конкреций и заканчивая металлургическим переделом комплексного вида сырья, содержащего широко востребованные никель, медь, кобальт и марганец. Однако, долгосрочные последствия разработки подводных месторождений не ясны до сих пор, и в мире существует мощное движение противников этого глобального проекта. Против глубоководной добычи выступают не только защитники окружающей среды, но и видные ученые, политические группы, представители электротехнической и автомобильной промышленности.

Практические испытания сборщиков конкреций (huge combine harvesters) показали обнадеживающие результаты. Самоходные гусеничные машины успешно передвигаются по океаническому дну, свободно маневрируют, собирают конкреции в режиме «скребка» (проект «Patania» компании «GSR») или «вакуумного пылесоса» (проект «Pelagic» компании «AllSeas») и складывают конкреции в специальных накопителях. В обоих случаях происходит полное разрушение и перемещение 10-20-сантиметрового слоя осадков и формирование мутьевых факелов (плюмов), которые разносятся на значительные расстояния от центра возмущения. Вместе с донными отложениями перемещаются и уничтожаются частично или полностью различные виды пелагического бентоса. Технологии подъема собранных конкреций непрерывным потоком на поверхность находятся ещё в стадии отработки. Здесь существует ряд сложных проблем.

В ближайшие годы мировой общественности должны быть представлены ясные представления о необходимости и возможности разработки подводных месторождений, отработаны модели экономической эффективности всего жизненного цикла рудных объектов, модели оценки рисков для существования экосистем и условий их восстановления, выбраны и проверены все звенья технологических процессов сбора, подъема, транспортировки и металлургического передела конкреционного сырья, разработаны эффективные механизмы и технологии для различных работ и наблюдений на больших глубинах.

Роль и значение инженерно-геологической информации при освоении глубоководных месторождений ЖМК

В названных направлениях научных и практических исследованиях инженерная геология занимает далеко не последнее место. Проектирование и испытания всего технологического комплекса подводных работ невозможно без детальной инженерно-геологической характеристики добычных блоков и прилегающих участков океанического дна. Востребованность этой информации, в том числе для решения экологических проблем, интенсивно возрастает.

В настоящее время под эгидой МОМД ведется активная работа по созданию «Правил разработки минеральных ресурсов в Районе» (имеются в виду разведочные районы контракторов), которые будут регламентировать нормы, правила и процедуры в отношении разработки минеральных ресурсов в международном районе морского дна. Разработка горного кодекса для подводных месторождений – насущная задача сегодняшнего дня.

На современном этапе исследований разведочных районов ЖМК МОМД ориентирует контракторов на получение и обобщение информации, включающей в себя:

1. разработку, стандартизацию и тестирование концепций и стратегий мониторинга морской и геологической среды;
2. изучение краткосрочных перспектив добычи конкреций, а также среднесрочных потенциальных экологических последствий сбора конкреций;
3. разработку потенциальных мер по смягчению последствий выемки конкреций;
4. разработку технологических схем отработки перспективных блоков и планов автоматизированного управления производственным процессом;
5. разработку обоснованных методик оценки рисков, выгод и неопределенностей, а также методик, которые могут быть закреплены в будущих нормативных актах и руководящих документах для всего мирового сообщества, озабоченного выбором оптимально стратегии эксплуатации минеральных ресурсов Мирового океана.

К указанному списку следует добавить необходимость получения исчерпывающих данных о составе, состоянии и свойствах донных образований, составляющих геологическую среду месторождений ЖМК и населяющего их пелагического бентоса.

Состояние изученности Мирового океана в приразломной зоне Кларион-Клиппертон

В настоящее время в указанной зоне развернули свои исследования 17 правительственных и неправительственных организаций из разных стран, заключивших с МОМД в разное время (начиная с 2001 года) лицензионные соглашения, предусматривающие выполнение целого ряда обязательств в отношении производства работ, отчетности и контроля со стороны международного органа.

В целом программы исследований в разведочных районах охватывают несколько ключевых направлений:

- гидрофизический режим придонных и поверхностных вод;
- гидрохимический режим придонных и поверхностных вод;
- перенос и трансформация взвешенного и донного вещества;
- состав и физико-механические свойства донных осадков и ЖМК;
- состав глубоководной биосистемы и воздействие на неё добычных операций.

В соответствии с требованиями МОМД первичная характеристика разведочного района для любого подрядчика укладывается в предварительную оценку состояния окружающей среды и последствий нарушения сложившихся природных равновесий (ОВОС). Несмотря на трудности, возникшие в связи с пандемией Ковид-19, все подрядчики справились с данной задачей и к 2021 году опубликовали развернутые отчетные материалы, представляющие большой интерес для планирования и производства дальнейших исследований. Отдельные аспекты ОВОС предполагается отработать в ближайшие годы. В ходе выполненных исследований не только существенно расширились знания о Мировом океане, но и было опробовано новое аппаратно-техническое подводное обеспечение, методики контактных и дистанционных наблюдений, новые материалы и элементная база систем управления, сделан существенный вклад в разработку интеллектуальной системы управления всем технологическим процессом сбора и использования конкреций.

В 2011 году на 17 сессии МОМД был представлен план экологического обустройства для всей зоны Кларион-Клиппертон, разработанный в период 2007–2010 гг. и утвержденный Советом МОМД в 2012 году. Основным смыслом этого плана заключался в том, чтобы по периферии приразломной зоны Кларион-Клиппертон выделить и сохранить в первозданном виде 9 районов с особым природоохранным режимом, при этом в каждом районе необходимо выделить участок размером 200x200 км с буферной зоной в 100 км, представляющий особый экологический интерес (см. рис. 1). Предполагается, что такие районы будут гарантировать восстановление природной океанической среды и биоты после начала промышленной добычи конкреций.

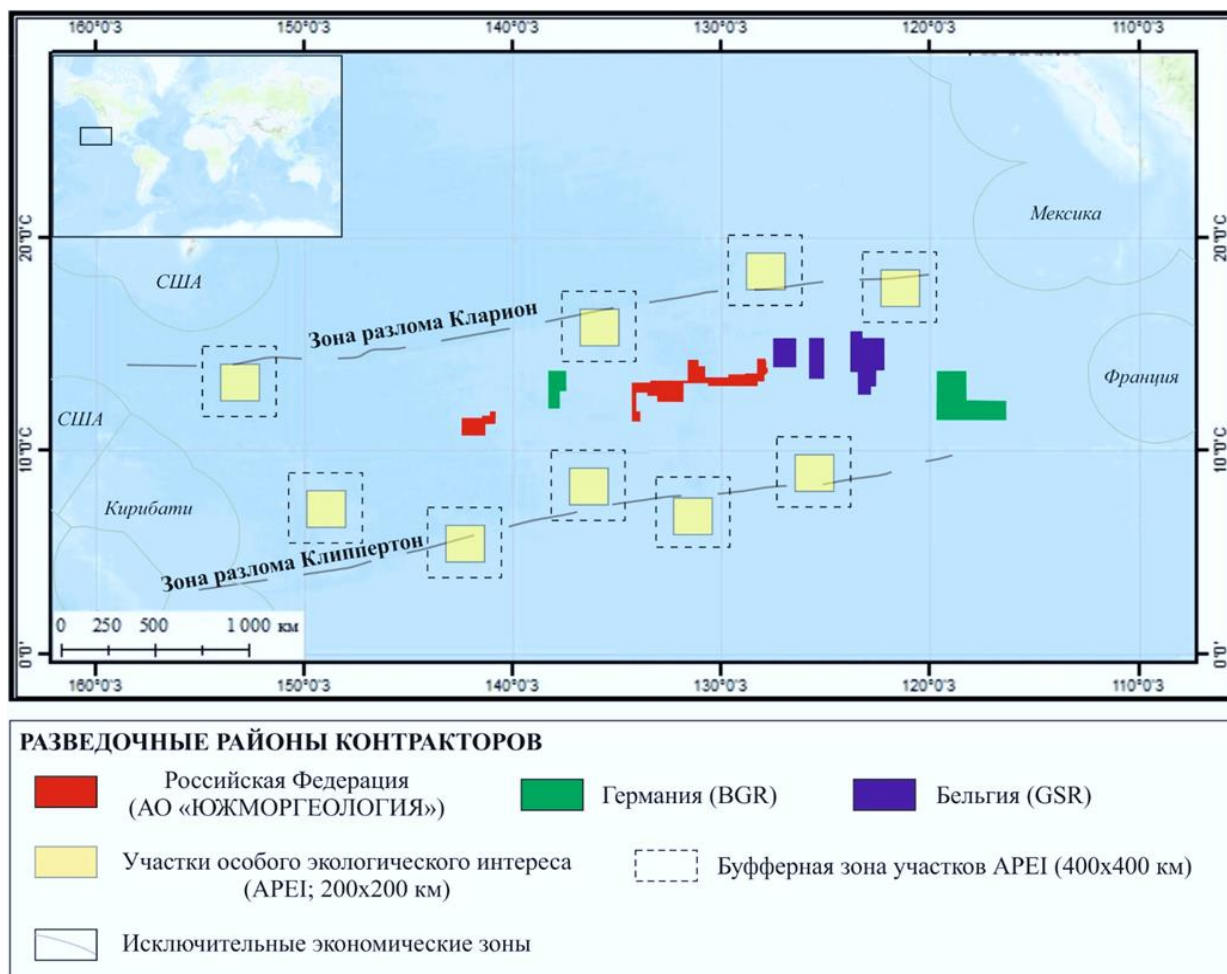


Рис. 1 Схема расположения биогеографической провинции приразломной зоны Клариион - Клиппертон с выделенными регионами особого природоохранного режима

Новое международное соглашение по Мировому океану, принятое 193 странами, (New High Seas Treaty, 2023) несомненно приведет к определенной корректировке упомянутой выше природоохранной программы. Это открывает перед инженерно-геологическими исследованиями новые горизонты, ставит новые задачи в связи с меняющейся обстановкой и требует неукоснительного учета результатов, достигнутых другими подрядчиками. Помимо глобального мониторинга зоны всей биогеографической провинции Клариион-Клиппертон возрастает роль локального мониторинга, охватывающего рабочие площадки и эталонные участки океанического дна, не затронутые опытными работами. Инженерно-геологическая изученность таких участков должна соответствовать новым условиям. Необходимо постоянно корректировать теоретические, научно-методические, аппаратные и технологические аспекты изучения месторождений ЖМК и проблемы их добычи в соответствии с опытом, накопленным различными подрядчиками.

Задачи дальнейших инженерно-геологических исследований в РРР-ЖМК

Инженерно-геологические исследования в РРР-ЖМК связаны с дальнейшим развитием геологоразведочных работ на разведочной стадии, когда необходимо не только расширить и углубить общий объем специализированной информации, но и конкретно выбрать рабочие и эталонные полигоны испытания добычной техники и технологий.

На первом этапе разведочного цикла необходимо выполнить:

- *подготовку инженерно-геологической информации в пакете технико-экономического обоснования (ТЭО) о целесообразности промышленного освоения месторождений с проектом постоянных кондиций;*
- *разработку специализированной БД по инженерно-геологической характеристике и оценке первоочередных объектов, намеченных к разработке, и подключение ГИС/ИГ к общей ГИС месторождений;*
- *получить дополнительную инженерно-геологическую характеристику и оценку отдельных участков детальной разведки и опытной разработки (уточнение условий залегания пород и осадков, изменчивость состава и свойств, геодинамические аспекты).*

Данный этап требует соответствующего инженерно-геологического картографического обеспечения в масштабе 1:25 000 – 1:50 000.

На втором этапе разведочного цикла необходимо выполнить:

- *дополнительную инженерно-геологическую характеристику и оценку отдельных площадок размещения различного оборудования и трасс перемещения техники при производстве добычных работ, площадок размещения оборудования для мониторинга за состоянием окружающей среды.*

Выполнение этой задачи неразрывно связано с инженерно-геологическими картами в масштабе 1:2 000 – 1:10 000.

В целом предлагаемая детализация инженерно-геологической обстановки позволит:

- *на основе детальной батиметрии выявить все виды препятствий на морском дне (уступы, воронки, выходы на донную поверхность дочетвертичных образований), оптимизировать расположение станций пробоотбора и разработать рабочий план движения опытных агрегатов сбора ЖМК в пределах выбранных рабочих полигонов, чтобы затем оценить эффективность как отдельных операций, так и всего технологического процесса сбора и транспортировки конкреций;*
- *отобрать пробы донных осадков с минимальным нарушением естественного сложения, применяя специальные пробоотборники;*
- *отработать методику применения автономных подводных аппаратов (AUV), роботов (ROV) и автоматических буйковых станций (ADCP) для изучения морфологии дна, условий формирования физико-механических свойств поверхностного слоя осадков и геодинамических параметров среды;*
- *в полном объёме выполнить изучение физико-механических свойств осадков и поровых вод на борту судна и в стационарной лаборатории, в том числе создать представительную базу данных показателей прочности и деформируемости донных осадков для проектирования различных машин и механизмов, способных безотказно работать на экстремальных глубинах;*
- *уточнить инженерно-геологическую стратификацию разреза и оценить несущую способность донных образований, подстилающих конкреционный слой;*
- *составить комплект специальных карт инженерно-геологического содержания, в том числе карту инженерно-геологических условий и карту инженерно-геологического районирования;*
- *проверить полученные данные по ФМС донных образований в реальном конструировании и расчётах гусеничных шасси, различного рода манипуляторов и захватов с учетом необходимых усилий по извлечению конкреций из осадков, по их перемещению и подъёму на поверхность.*

Отметим, что поставленные задачи, основанные на четком понимании необходимости специализированной характеристики геологической среды в разрезе ее рационального использования и охраны, вполне по силам выполнить российскому подрядчику, опираясь на традиции и достижения отечественной инженерной геологии, стоящей у истоков глубоководных геологоразведочных работ в Мировом океане. У зарубежных подрядчиков наблюдаются лишь фрагментарные исследования по инженерно-геологической тематике, традиционно привязанные к общим геотехническим представлениям и моделям. Однако в работах зарубежных подрядчиков с инженерно-геологических позиций привлекает внимание несколько тематических направлений:

- опыт организации и планирование работ больших морских экспедиций;
- отбор проб воды, осадков и конкреций на различные виды исследований;
- определения физико-механических свойств донных образований *in situ*, в бортовой и стационарной лабораториях;
- проекты и результаты испытаний сборщиков конкреций;
- сопутствующие исследования, расширяющие представления об инженерно-геологических условиях различных районов океанического дна.

В целом, результаты работ подрядчиков, осуществляющих работы в провинции Кларифон-Клиппертон, свидетельствуют о существенном прогрессе в реализации проектов промышленной добычи конкреций. Это касается как изучения всего комплекса природных факторов в разведочных районах, так и разработки технологического цикла добычи и переработки конкреций вплоть до получения конечной продукции. Эти успехи опираются на значительные финансовые затраты, которые для лидирующих организаций исчисляются сотнями миллионов долларов США за последнее десятилетие.

Пандемия Ковид – 19 несколько затормозила реализацию некоторых исследовательских программ, но в ближайшее время следует ожидать дальнейшей интенсификации деятельности подрядчиков по всем научно-практическим направлениям. Первые результаты этой многоплановой и очень трудной работы следует ожидать к 2030 году.

УДК 551.462

Рубрика 38.47.19

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИКАВКАЗСКИХ ПОДВОДНЫХ
КАНЬОНОВ ЧЕРНОГО МОРЯ

MORPHOLOGICAL FEATURES OF THE PRE-CAUCASIAN UNDERWATER CANYONS
OF THE BLACK SEA

Глазырин Евгений Анатольевич

АО "Южморгеология", Геленджик

Glazyrin Evgeny Anatolievich

JSC «YUZHMOREGEOLOGIYA», Gelendzhik

Подводные каньоны (каньоны) служат важными геоморфологическими элементами континентального склона и каналами передачи осадочного материала из прибрежных зон в морские котловины [11, 15]. Морфологические особенности каньонов и причины этого остаются предметом исследований. Общие сведения о каньонах Черного моря и основные публикации о них даны в [3, 10, 14]. Цикличность климатических изменений и связанных с ними рельефообразующих экзогенных процессов, колебаний уровня моря, не оставляют сомнений и в цикличности развития каньонов, отражении в их морфологии.

В основе сообщения лежит анализ модели рельефа дна, синтезированной на основе выполненной в 1996-1998 гг. ГНЦ «Южморгеология» съемки многолучевым эхолотом Simrad EM-12, сведений о глубинах с ресурса [13]. Используются материалы сейсмоакустического профилирования, гидролокации бокового обзора, подводного видеообследования, опробования донных отложений, полученные при проведении государственного геологического картирования масштаба 1:200 000, государственного мониторинга состояния недр прибрежно-шельфовой зоны, опубликованные данные.

Из наиболее крупных каньонов в российском секторе выделены Анапский, Голубого потока (Вуланский), Шахе, Мзымты [2], а также Бзыбь, заходящий с абхазского сектора (рис.). Наиболее активными являются каньоны Шахе и Мзымты. Они располагаются напротив устьев рек, соответственно, Шахе и Мзымта. Геоморфология и литодинамика этих каньонов рассмотрена в ряде публикаций [3-7]. Остальные каньоны, расположенные севернее, в современный период обладают меньшей активностью или не активны. Это связывается с их оторванностью от бассейна денудации более широкой полосой шельфа, что согласно [14] вызвано высоким стоянием уровня моря.

Головная часть каньона Шахе изогнутым клином вдается в шельфовую часть на 8 км (рис.). Ширина вреза достигает 8 км, а глубина до 700 м. Длина каньона Шахе составляет около 85 км с превышением в 2050 м.

Головная часть каньона Мзымты за счет предельного приближения к берегу имеет широкий фронт (рис.), образованный ответвлениями, носящими самостоятельные названия [8]. Глубина эрозионных врезов этих ответвлений достигает 100-150 м. Длина русла каньона Мзымты составляет около 95 км, с перепадом высот 2,025 км. Глубина вреза составляет

преимущественно 200-400 м, при ширине долины до 8 км. В каньон Мзымты впадает ряд других каньонов - Кудепста, Псоу, Бзыбь, образуя веерообразную каньонную систему (рис. 1).

К каньонам примыкают обширные плоские конуса выноса, протягивающиеся в абиссальную котловину Черного моря.

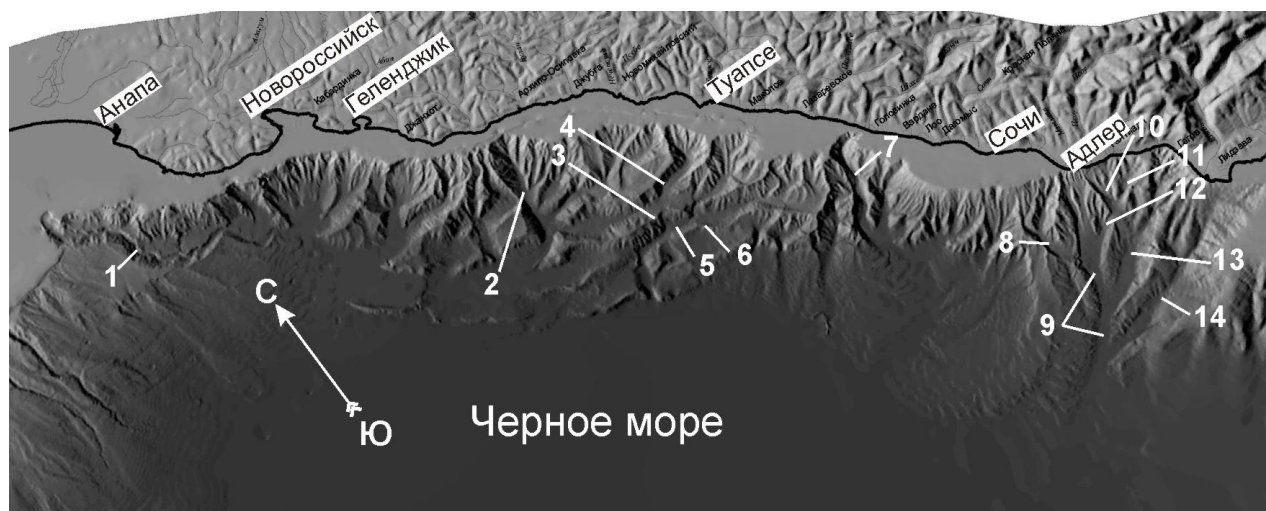


Рис. 1. Светотеневая модель рельефа северо-восточной части Черного моря

Цифры: 1 - Анапский каньон; 2 - каньон Голубого потока; 3 - хребт Андрусова; 4 - долина Кумани; 5 - долина Снежинского; 6 - хребт Лазарева; 7 - каньон Шахе; 8 - каньон Кудепста; 9 - каньон Мзымты; 10 - каньон Псоу; 11 - каньон Чигирипш; 12 - каньон Псоу 1; 13 - каньон Псоу 2; 14 - каньон Бзыбь.

В продольном профиле каньонов в соответствии с [12] выделено несколько морфологических участков, различающиеся литодинамикой [3-5]:

- выпуклый (оползневой) весьма узкий (около 100 м). Соответствует интервалу перехода вершины каньона в шельф;
- врезанный каньон с выраженным вогнутым профилем. У каньона Шахе он протягивается на расстояние порядка 32 км до глубины 1750 м, у каньона Мзымты - на 25 км до глубины 1500 м. Это участок разветвления вершинной части и укоренения днища. Поперечный профиль каньона и его ответвлений на этом участке имеет V-образное сечение, в нижней части до U-образного с расширением. Некоторые отвершки каньонов имеют щелеобразный поперечный профиль, местами с отрицательными углами наклона стенок;
- затруднения движения. Он наиболее протяженный и отвечает пологому днищу каньона. На этом участке днище имеет выраженный корытообразный поперечный профиль шириной до 8 км. В основное русло каньона здесь впадают крупные боковые каньоны, преимущественно левого борта, дополнительно сгружающие сюда осадочные массы. Продольный профиль участка имеет ступенчатое строение за счет развития оползневых процессов в сгруженных донных отложениях, русло испытывает меандрирование. У каньона Шахе этот участок протягивается на расстояние около 53 км до глубины 2100 м. У каньона Мзымты - на расстояние в 73 км до глубины 2030 м;
- глубоководный конус выноса. У каньона Шахе он протягивается на расстояние до 50 км при ширине в 15 км до глубин около 2130 м. Конус выноса каньона Мзымты протягивается на 53 км до глубин около 2100 при ширине до 28 км. Далее конуса выноса нарастаются шлейфами разноса донного материала контурными течениями.

Осадочная структура и морфология каньонов свидетельствует об их циклической активности, прерываемой частичной засыпкой. Обоснованием служит существование висячих долин, валунно-галечный материал на участках, где в современный период накапливается фациально более дистальный тип осадков [3-5, 7].

Выделяется несколько морфологических типов вершин каньонов в плане, характеризующие стадии развития: клиновидный с веером ответвлений (активное развитие и продвижение каньона); округлая вершина (переходный тип); раструбный (предельный, блокируемый береговой зоной с развитием в бока и перехватом вдольберегового транзита осадочного материала). Это разделение морфологии действительно как для отдельных отвершков каньонов, так и для собственно вершинной части всего каньона [3].

Анализ цифровой модели рельефа, сонарного изображения морского дна и сейсмоакустических разрезов показывают наличие различной перестройки каньонов прикавказской части Черного моря - отмерших долин, перетекания транспортирующего потока в соседний каньон, миграции и бифуркации русел, пересечения и перехвата русловых потоков, пересечения каньонов [6, 7]. Это связывается как с глобальными, так и региональными и локальными событиями [9].

В системе каньонов Мзымта-Бзыбь выявлено X-образное пересечение долин каньонов Псоу и Чигирипш [6, 7] (рис.). Для его детальной характеристики и интерпретации не хватает детальности рельефа морского дна и геолого-геофизических данных.

С активным ростом антиклинальных складок майкопа в Туапсинском прогибе и адаптацией абразионно-эрозионных русловых процессов по отношению к осям растущих складок [1] связывается отмирание долин и перехват русел каньонов, наблюдаемые в районе хребтов Лазарева, Андрусова и долин Снежинского и Кумани (рис.) [6].

Отражением локальных событий служат перестройки и пересечения русел на оползневых участках. Примером может служить участок затруднения движения каньона Шахе [6]. Здесь днище и борта каньона имеют поперечный волнисто-грядовый рельеф за счет развития крупных оползней. Высота гряд оползневых блоков достигает 30 м, ширина – до 1,5 км, длина до 7 км. Оползневые осложнения рельефа приводят здесь к разветвлению тальвега каньона, миграции и разделению транспортирующих потоков по ложбинам между оползневыми грядами, и вновь к их слиянию. Литодинамические потоки с более крутого левого (восточного) борта каньона на сонарном изображении дна имеют признаки пересечения русел каньона за счет своей большей энергии.

В нижней части каньона Кудепста выявлен перехват и практически поперечная переориентация русла вдоль трещин отрыва крупных оползневых блоков [6]. Сам каньон Кудепста в настоящее время служит примером висячей долины при впадении его в каньон Мзымты [7] (рис.). Головная часть каньона Кудепста в настоящее время отдалена от поставки терригенного материала (бассейна денудации) более высоким современным стоянием уровня моря, он менее активен.

Примером бифуркации русла служит конус выноса системы каньонов Мзымта-Бзыбь. Конус выноса состоит из нескольких разновозрастных лопастей, в пределах которых присутствуют расходящиеся веером русловые промоины [6].

Приведенные примеры с учетом еще относительно слабой и мелкомасштабной изученности рельефа и геологии дна российского сектора Черного моря не исчерпывают морфологические особенности прикавказских подводных каньонов и причины их трансформаций. Они показывают, что на литодинамическую систему и эволюцию морфологии каньона оказывает влияние изменение уровня моря, связь с бассейном денудации, эндо- и экзогеодинамические процессы.

Финансирование

Исследования выполнены по программе Государственного мониторинга состояния недр.

Список литературы:

1. Альмендингер О.А., Митюков А.В., Мясоедов Н.К., Никишин А.М. Современный рост складок, процессы эрозии и седиментации в глубоководной части Туапсинского прогиба в Черном море // Доклады Академии Наук. - 2011. - Т. 439. № 1. - С. 76–78.
2. Андреев В.М., Шельтинг С.К. К геоморфологии Российского сектора Чёрного моря // Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. - М.: 2007. - С. 6-8.
3. Глазырин Е.А., Мараев В.Л. Подводные каньоны Мзымты и Шахе: морфология, литодинамические процессы // Система Черного моря. - Москва: Научный мир, 2018. - С. 84-105. DOI: 10.29006/978-5-91522-473-4.2018.84
4. Глазырин Е.А. Морфология и литодинамика каньона Мзымта, как фактор влияния на береговую зону Сочи // Грозненский естественнонаучный бюллетень. - 2018. - Том 3, № 2 (10), - С. 16-25. DOI: 10.25744/genb.2018.10.2.002
5. Глазырин Е.А. Геоморфология и литодинамика подводных каньонов как инженерно-геологический фактор освоения углеводородных ресурсов (на примере Российского сектора Черного моря) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. - 2019. - Т. 14. № 2. - С. 1-12. DOI: https://doi.org/10.17353/2070-5379/18_2019
6. Глазырин Е.А. Перестройка русел и перехват подводных каньонов прикавказской части Черного моря // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XI / Под ред. И.А. Керимова, В.А. Широковой, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. - М.: ИИЕТ РАН, 2021. - С. 36-43. DOI:10.34708/GSTOU.2021.57.88.007
7. Глазырин Е.А., Мараев В.Л. К морфологии системы подводных каньонов Мзымта-Бзыбь (Черное море) // Геология морей и океанов: Материалы XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. - М.: ИО РАН, 2021. - С. 216-220.
8. Имеретинская низменность. Природно-геологические условия, проблемы освоения / И.П. Балабанов, С.П. Никифоров, И.С. Пашковский и др.; под редакцией И.П. Балабанова. - М.: ООО «Издательский дом Недра», 2011. - 281 с.
9. Лисицын А.П. Лавинная седиментация и перерывы в осадконакоплении в морях и океанах. - М.: Наука, 1988. - 309 с.
10. Мельник В.И. Подводные каньоны Черного моря // Геологический журнал. - 1986. - Т. 46. № 6. - С. 72-79.
11. Сафьянов Г.А., Меншиков В.Л., Пешков В.М. Подводные каньоны: их динамика и взаимодействие с береговой зоной океана. - М.: ВНИРО, 2001. - 197 с.
12. Brothers D.S., Brink U.S., Andrews B.D. et al. Geomorphic process fingerprints in submarine canyons // Marine Geology. - 2013. - 337. - P. 53–66.
13. Navionics [Электронный ресурс]. Режим доступа: // URL: <https://www.navionics.com/fin/charts> (дата обращения 15.01.2021).
14. Jipa D.C., Panin N. Narrow shelf canyons vs. wide shelf canyons: Two distinct types of Black Sea submarine canyons // Quaternary International. - 2020. - Т. 540. - P. 120-136.
15. Shepard F.P., Dill R.F. Submarine canyons and other sea valleys. - Rand McNally, Chicago, Illinois. 1966. - 381 p.

Морская геология

Стендовые доклады

Marine geology

Poster presentations

УДК 551.89

Рубрика 38.33.17

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В СРЕДНЕМ-ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКЕ НА ОСНОВЕ ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНАЛИЗОВ

RECONSTRUCTION OF SEDIMENTATION CONDITIONS IN THE MIDDLE-LATE HOLOCENE IN THE SOUTHEASTERN BALTIC ACCORDING TO LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALYSES

Ласкина Дарья Николаевна^{1,2}, Дорохова Евгения Валерьевна^{1,2}

¹*Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (БФУ им. Канта), Калининград*

²*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИОРАН), Москва*

Laskina Daria Nikolaevna^{1,2}, Dorokhova Evgenia Valerievna^{1,2}

¹*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

²*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Введение

Балтийское море является внутриматериковым окраинным морем. Оно характеризуется особым гидрологическим режимом: его водообмен с океаном крайне ограничен и происходит через узкие и мелководные Датские проливы. Воды Северного моря периодически поступают в бассейн в виде затоков и, поскольку эти воды более солёные и плотные, формируют систему придонных течений. Для моря характерно наличие сероводородных «мёртвых» зон гипоксии и аноксии в глубоководных впадинах в виду присутствия постоянного галоклина, препятствующего вертикальному перемешиванию водной толщи. Затоки североморских вод насыщают кислородом впадины и сокращают в размерах «мёртвые» зоны. Описанный современный режим водообмена установился около 8500 лет назад с началом морской (литориновой) стадии Балтийского моря, сменившей озерную стадию.

Цель исследования – реконструировать условия осадконакопления в Гданьской впадине (Юго-Восточная Балтика) за последние 8500 лет на основе литолого-геохимических данных.

Материалы и методы

В ходе работы была исследована колонка донных осадков АСВ-54029 (55,273° с. ш., 19,694° в. д., глубина отбора 98,5 м, длина 3,54 м), отобранная в ноябре 2022 г. в восточной части Гданьской впадины (Юго-Восточная Балтика) в эрозионном канале, сформированном течением затоков североморских вод. Согласно литологическому описанию в колонке было выделено две секции, соответствующие различным стадиям развития Балтийского моря. Верхняя секция (0 - 123 см) представлена илами морской литориновой стадии. Нижняя секция

(123 - 354 см) представлена серыми глинами, соответствующими озёрным стадиям (10700 - 8500 лет назад) [6]. Исследование выполнено только для верхней секции колонки.

Литолого-геохимические исследования включали определение элементного состава донных осадков с помощью рентгено-флюоресцентного анализа (РФА) (частота измерений - 1 см), анализ магнитной восприимчивости (МВ) (частота измерений – 0,5 см) и анализ гранулометрического состава (частота измерений – 1 см).

РФА производился при помощи портативного энергодисперсионного анализатора Olympus Vanta C, оснащённого серебряным анодом, кремниевым дрейфовым детектором и рентгеновской трубкой мощностью 4 Вт. В исследовании использовались концентрации элементов, пересчитанные на сухой вес осадка, и логарифмы соотношений концентраций элементов. Анализ МВ был выполнен с помощью системы измерения Bartington MS3 с поверхностным сканирующим датчиком Bartington MS2E. Для выполнения РФА и МВ поверхность колонки донных осадков зачищалась и покрывалась специальной плёнкой толщиной 5 мкм. Анализ гранулометрического состава производился с помощью лазерного дифракционного анализатора частиц SALD-2300 (Shimadzu), интервал измерений составил 1 см. Перед анализом каждая проба выдерживалась в растворе триполифосфата натрия и подвергалась ультразвуковой обработке для улучшения диспергации осадка.

Результаты и обсуждение

На основе полученных результатов были построены графики вертикального распределения в колонке концентраций Pb, среднего размера (СР) частиц фракции 10-63 мкм, содержания воды в осадке, МВ, а также логарифмов отношений концентраций элементов $\log_2(S/Ti)$, $\log_2(Zr/Rb)$, $\log_2(Si/Ti)$ и $\log_2(Mn/Ti)$.

Значения концентраций Pb могут служить временным репером для литориновых илов впадин Балтийского моря [4]. В исследованной колонке на горизонтах 32-123 см они изменяются в пределах от 0 до 12 ppm, что не превышает принятых для Балтийского моря фоновых значений [3]. В верхних горизонтах 0-35 см содержание этого элемента заметно выше (максимальное значение 32 ppm на горизонте 3 см) (Рисунок 2). Это связано с увеличением его поступления в последние 800 лет в результате антропогенной деятельности [4].

В качестве показателя динамики среды осадконакопления использованы средний размер фракции 10-63 мкм и отношение концентраций Zr/Rb, отражающие относительные скорости придонных течений [7, 8], (Рисунок 1).

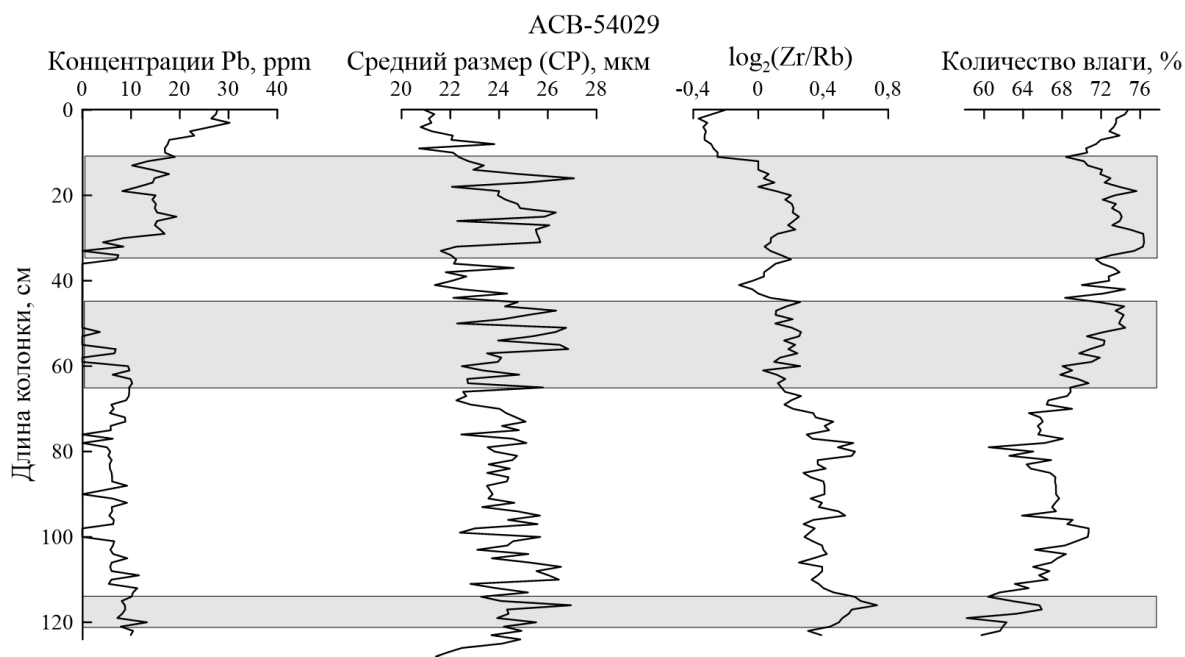


Рисунок 1 – Содержание свинца, средний размер фракции 10-63 мкм и количество влаги в колонке ACB-54029. Серым цветом выделены интервалы с увеличенной интенсивностью придонных течений.

Отношение концентраций Zr/Rb показывает, что размер осадка в целом уменьшается от нижних горизонтов к поверхности (значения изменяются от максимума 0,75 на 116 см до минимума -0,37 практически под поверхностью). Значения CP, полученные при помощи лазерного дифракционного анализатора, колеблются в пределах 20 - 27 мкм, при этом не показывая видимого тренда. Однако при сравнении графиков можно выделить следующие общие черты. На горизонте 113-120 см в обоих параметрах наблюдаются повышенные значения, что может соответствовать началу литориновой трансгрессии, около 8500 лет назад [1]. На горизонтах 44-65 см и 13-34 см также отмечается рост CP осадка, что показывает увеличение интенсивности придонных течений, не позволяющих осаждаться более тонким фракциям. Таким образом, выделены три периода интенсификации придонных течений, приходящихся на начало литориновой трансгрессии и на поздний голоцен, принимая равномерные скорости осадконакопления в исследуемый интервал.

Между соотношением концентраций Zr/Rb и количеством влаги (Рисунок 1) видна обратная зависимость. Это косвенно подтверждает правомерность использования показателя Zr/Rb как индикатора размера осадка, поскольку более тонкий осадок имеет большую влажность.

Различия в графиках CP и Zr/Rb можно объяснить высоким содержанием органического вещества в осадке (до 6-8% согласно [9]). Поскольку показатель Zr/Rb отражает отношение тяжёлых минералов к глинистым, наличие органики в осадке не влияет на результат. Однако при анализе на лазерном дифракционном анализаторе большое количество органических частиц, которые имеют свойство образовывать "хлопья", может повлиять на значения CP. На горизонте 95-112 см расхождение данных CP и Zr/Rb возможно объясняется наличием органики, что подтверждается повышением значений соотношений концентраций S/Ti и Si/Ti, а также снижением значений MB [2] (Рисунок 2).

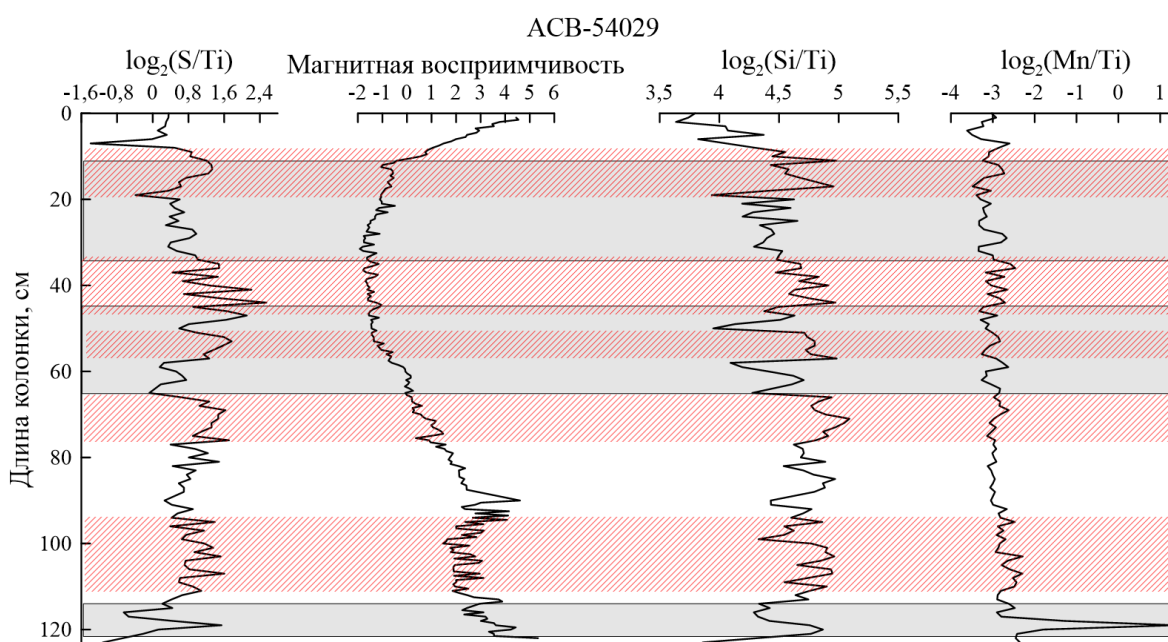


Рисунок 2 - Геохимические показатели. Серым цветом выделены интервалы усиления придонных течений по данным CP и $\log_2(Zr/Rb)$, красной штриховкой – периоды гипоксии по геохимическим данным.

Изучение геохимических параметров позволило реконструировать окислительно-восстановительные условия во впадине в исследуемый период. Рост показателя $\log_2(S/Ti)$, который на горизонтах 7-19, 33-45, 50-56, 65-76 и 93-111 см и достигает значений 1,6-2,4, свидетельствует о более частых стагнационных периодах в этот отрезок времени [2]. Это подтверждается наличием микрослоистости на этих горизонтах по данным литологического описания, что характеризует отсутствие биотурбирующих организмов вследствие дефицита кислорода в придонном слое [5].

Пониженные значения MV наблюдаются на 7-19, 33-45, 65-76 и 89-112 см и соответствуют увеличению показателя $\log_2(S/Ti)$, что свидетельствует о восстановительных условиях [2]. Повышенная MV и пониженные значения $\log_2(S/Ti)$, а также наличие ракушечного детрита на 115-123 см (нижняя часть литориновой секции) свидетельствуют о периодическом насыщении придонной воды кислородом в этот период, что, вероятно, связано с литориновой трансгрессией в результате открытия Датских проливов около 8500 лет назад [6]. К этому событию можно так же отнести пик значений Mn/Ti на горизонте 118 см, который свидетельствует о наличии окислительно-восстановительной границы [10]. Показатель $\log_2(Si/Ti)$ отражает интенсивность биопродуктивности в поверхностных водных слоях [2] и пики его значений хорошо соотносятся с пиками значений $\log_2(S/Ti)$. Это, скорее всего, связано с тем, что гипоксия в придонных слоях усиливается, когда с поверхностных слоёв поступает больше органического вещества.

Сопоставление интервалов увеличения интенсивности придонных течений и периодов гипоксии во впадине показало, что периоды с частой гипоксией в целом не совпадают с периодами интенсивных затоков (Рисунок 2). Вероятно, поступающая с затоками вода насыщает кислородом придонные слои и условия осадконакопления меняются с восстановительных на окислительные.

Однако при очень частых затоках североморских вод в глубоководной впадине может усиливаться водная стратификация, так как поступающая вода обладает более высокой солёностью и плотностью. Если биологическая продуктивность моря повышена, то на дно

попадает большое количество органики, которая, разлагаясь, потребляет весь привносимый затоками кислород. Из-за усиленной стратификации не происходит вертикального перемешивания водного столба и насыщенные кислородом верхние водные слои не проникают в глубокие части впадины, что может приводить к гипоксии. Такие условия могли соответствовать интервалам 10-19 и 50-56 см в исследованной колонке (Рисунок 2).

Выводы

Таким образом, в колонке донных осадков, отобранной в Гданьской впадине на пути распространения североморских вод, выделены интервалы увеличения интенсивности затоков 44-65 см, 13-34 см и 113-120 см. Выделены горизонты, отражающие периоды гипоксии: 7-19, 33-45, 50-56, 65-76 и 93-111 см, а также граница начала роста концентраций свинца (около 1200 г. н. э.) [4].

Сопоставление интервалов увеличения интенсивности придонных течений и периодов гипоксии во впадине показало, что периоды гипоксии не совпадали с периодами интенсивных затоков, кроме интервалов 10-19 и 50-56 см. Вероятно, в эти периоды усиление стратификации в результате более частых затоков североморских вод сопровождалось увеличением биопродуктивности моря и ростом поступления органического вещества в осадок где, скорее всего, присутствовала сильная плотностная стратификация водного столба.

Для более точной реконструкции гидрологических событий планируется выполнить дополнительные анализы, в том числе определение содержания органического вещества в осадке, определение возраста осадков, гранулометрический анализ после удаления органического вещества в осадке.

Финансирование

Гранулометрический анализ и интерпретация результатов выполнены при поддержке РФФ, проект № 22-17-00170, <https://rscf.ru/project/22-17-00170/>.

Список литературы:

1. Andrén E. Holocene history of the Baltic Sea as a background for assessing records of human impact in the sediments of the Gotland Basin// The Holocene – 2006. V. 10, I. 6. P. 687-702
2. Nicholas L. Balascio. A multi-proxy approach to assessing isolation basin stratigraphy from the Lofoten Islands, Norway // Quaternary Research – 2011. – № 75. – P. 288-300.
3. Shahabi-Ghahfarokhi S, Josefsson S, Apler A, et al Baltic Sea sediments record anthropogenic loads of Cd, Pb, and Zn.// Environmental Science and Pollution Research – 2020. – V.28, I.8, P. - 6162-6175
4. Zillén L, Lenz C, Jilbert T Stable lead (Pb) isotopes and concentrations - A useful independent dating tool for Baltic Sea sediments // Quat Geochronol – 2012. - V. 8,P. - 41–45.
5. Zillén L. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact // Earth-Science Reviews – 2008. – № 91. – P. 77-92.
6. Rosentau A. Submerged Landscapes of the European Continental Shelf // Quaternary Paleoenvironments – 2017. – P. 103-134

7. McCave I.N. Sortable Silt and Fine Sediment Size Composition Slicing - Parameters for Paleocurrent Speed and Paleoceanography / I. N. McCave, B. Manighetti, S. G. Robinson // *Paleoceanography* – 1995. – V. 10 – № 3 – P. - 593–610
8. Croudace, I.W. and Rothwell, R.G. 2015. *Micro-XRF Studies of Sediment Cores*, Developmen., <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>.
9. Emelyanov, E.M. 2002. *Geology of the Gdansk Basin, Baltic Sea*. Emelyanov, E. M. (ed.).
10. Ponomarenko E. Holocene palaeoenvironment of the central Baltic Sea based on sediment records from the Gotland Basin // *Regional Studies in Marine Science* - 2023. - №63. - P. 1-14

УДК 551.435.36

Рубрика 38.47.00

МОРФОДИНАМИКА БЕРЕГОВ ОСТРОВА КУНАШИР (ЮЖНЫЕ КУРИЛЬСКИЕ ОСТРОВА)

COASTAL MORPHODYNAMICS OF KUNASHIR ISLAND (SOUTH KURIL ISLANDS)

Кузнецов Михаил Аркадьевич^{1,2}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва

² ИО РАН имени П.П. Ширшова, г. Москва

Kuznetsov Mikhail Arkadieievich^{1,2}

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Введение

Остров Кунашир является самым южным в Большой гряде Курильских островов. Его площадь составляет 1490 км². Он входит в состав Тихоокеанского огненного кольца, имеет сложную форму и состоит из нескольких вулканических массивов и горных кряжей, соединённых перешейками. На острове насчитывается более 10 вулканических аппаратов, из них четыре действующие и потенциально активные.

Курило-Камчатский регион, в том числе и остров Кунашир относится к 9-балльной сейсмической зоне [1]. Поэтому для населённых территорий опасны не только сами землетрясения, но и вызываемые ими цунами. Следы воздействия цунами 6 ноября 1958 г., 4 (5) октября 1994 г. и 11 марта 2011 г. свидетельствуют о том, что вся тихоокеанская сторона острова подвергается их воздействию. Максимальная зафиксированная высота заплеска цунами 1958 г. на Кунашире составила 2,5 м [2], в 1994 г. – до 4 м [3] и до 2,2 м в 2011 г. [2].

Материалы и методы исследования

Работы включали натурные наблюдения в рамках совместной экспедиции Экспедиционного центра Министерства обороны России и Русского географического общества “Восточный Бастион – Курильская гряда”, а также в рамках самостоятельных маршрутов осенью 2022 г. Получены данные о рельефе береговой зоны, проведено геолого-геоморфологическое описание берегов и морских террас с фотофиксацией характерных форм рельефа и следов проявления эндогенных и экзогенных рельефообразующих процессов. Полевые наблюдения были дополнены анализом разновременных спутниковых снимков высокого и сверхвысокого разрешения, которые позволили уточнить особенности динамики береговой зоны за период с 1980 по 2022 гг. Выполнен гранулометрический анализ образцов для выявления направлений перемещения наносов в береговой зоне.

В пределах острова установлено наличие берегов 4 морфолитогенетических типов, в

отдельный тип можно выделить техногенные берега (табл. 1, рис. 1). В основу выделения типов берегов положена морфогенетическая классификация [4].

Таблица 1. Морфолитогенетические типы берегов острова Кунашир

Типы берегов	Длина, км (%)
1. Абразионные берега с крутыми (до отвесных) активными клифами, выработанные в эффузивах и пирокластике	57,3 (15,8)
2. Абразионные ступенчатые берега с крутыми склонами, выработанные в эффузивах и литифицированной пирокластике	8,4 (2,3)
3. Абразионно-денудационные берега с отмирающими клифами, выработанные в эффузивах и литифицированной пирокластике	130,6 (36)
5. Аккумулятивные берега с полнопрофильными галечно-песчаными пляжами	163,6 (45)
Техногенные берега	3,2 (0,9)
Всего:	363,4 (100)

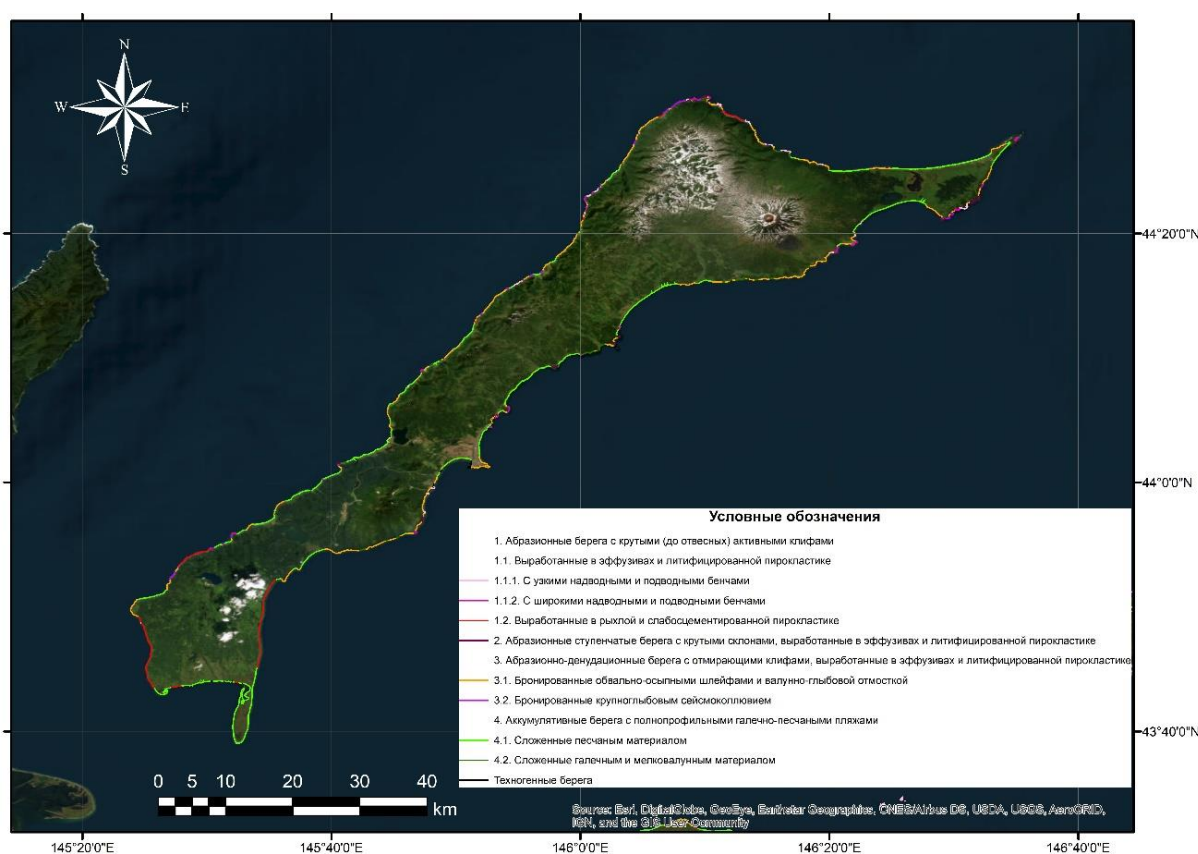


Рис. 1. Морфолитогенетические типы берегов острова Кунашир (исходный масштаб 1:100000)

Результаты

55% берегов острова Кунашир имеют абразионный облик вследствие его тектонического поднятия. Остальные 45% берегов являются аккумулятивными. Есть четкая специфика размещения аккумулятивных берегов приурочены в основном к перешейкам, заливам и

бухтам обеих акваторий острова, а также к открытому побережью тихоокеанской стороны острова Кунашир.

При изучении карт и снимков о. Кунашир бросается в глаза морфологическое различие рельефа охотоморского и тихоокеанского побережий: выравненность береговой линии 1-го и расчлененность 2-го. Это нетипично для Южных Курильских островов, обычно ситуация противоположная. Особенность объясняется наличием мелководного Южно-Курильского пролива между о. Кунаширом и о-вами Малой Курильской гряды. Глубины в его юго-западной части составляют 10-20 м, в средней части 20-70 м, в северо-восточной части они постепенно увеличиваются до 180 м [5]. Малая Курильская гряда, образовавшаяся ранее о. Кунашир, и мелководный пролив препятствуют длительному разгону волн и абразии выступов берегов, сформированных извержениями четвертичных вулканических построек. Побережье охотоморской стороны Кунашира отчасти защищено от абразии полуостровом Сиретоко (о. Хоккайдо) и узким Кунаширским проливом и имеет более выровненные очертания, однако на локальном уровне – это выравнивающиеся берега с множеством неглубоких бухт. На глубине бровки шельфа с охотской стороны острова плановый рисунок рельефа становится расчлененным, как и на остальных крупных островах Курильской гряды. Не менее существенным структурообразующим фактором, запечатлённым в рельефе острова, является дизъюнктивная тектоника, проявившаяся в перемещении блоков по разломам, главным образом, СЗ и СВ простирающихся. Следствием неоднородности неотектонических движений блоков является наличие разновысотных одновозрастных морских террас в пределах острова.

Главным процессом, оказывающим решающее влияние на морфодинамику берегов, является волнение. В течение года 2/3 всех волн находятся в диапазоне от 0,5 до 2 м высоты, 1/3 – 3 м и более. В сезон зимних штормов, высота волн достигает 4 м и более. Высота приливов достигает 1,8 м [6] и, в силу приглубости берегов, особенно охотоморской части, они не оказывают существенного влияния на динамику берега, в отличие от сгонно-нагонных явлений. Охотоморское побережье Кунашира относится к наиболее штормовым, на тихоокеанской стороне повторяемость штормов в 2-3 раза меньше. Морская акватория открыта для волнения северо-западных румбов.

Помимо постоянного ветро-волнового воздействия на острове эпизодически происходят экстремальные процессы, такие как землетрясения, извержения вулканов и цунами. За последние 50 лет, были зафиксировано извержение вулкана Тятя (в 1973 гг.), поступление лавового и рыхлого материала в береговую зону не происходило, поэтому это событие не повлияло на динамику берегов.

Главным опасным явлением для побережья Кунашира является цунами. Тихоокеанское побережье острова относится к цунамиопасному, охотоморское – к потенциально цунамиопасному. Повторяемость сильных цунами (более 4 м) для тихоокеанской стороны оценивается раз в 50-100 лет, 2-4 м – раз в 25 лет, 1-2 м – раз в 10 лет, на охотоморском побережье возможна высота заплеска до 1-2 м [2].

Сравнение контуров береговых линий на разновременных космоснимках показало, что устойчивые берега за последние 40 лет фактически не отступили (величина их отступления находится в пределах точности снимков и приливно-отливных колебаний). Максимальные скорости отступления береговой линии наблюдаются у абразионно-денудационных берегов с валунно-глыбовой отмосткой, не превышающие 0,2-0,3 м/год.

Крупные изменения претерпели абразионные берега с крутыми (до отвесных) активными клифами, выработанные в рыхлых и слабосцементированных пирокластических отложениях. Они испытывают отступление в среднем на 2-2,5 м/год (до 4 м/год) в районе Головинского клифа, а также на западном берегу у подножия вулкана Головина.

Аккумулятивные берега за последние 40 лет были наиболее динамичны. Максимальное выдвигание испытали берега п-ова Весловский (около 2,5 м/год, местами, в головной части, до 4 м/год) и берег в районе б. Головнина (около 1,5-1,7 м/год), а также в приустьевой части р. Филатова (1,5-2 м/год, в приустьевой части до 2,5 м/год) (рис. 2).

В 6-ми наиболее крупных заливах и бухтах с наибольшими изменениями берегов по результатам дешифрирования космоснимков за период с 1980 по 2022 годы, исследования морфологического облика, гранулометрии пляжевого материала и анализа розы ветров были выявлены направления перемещения наносов. Наличие активного вдольберегового перемещения наносов может привести к заносимости причальных сооружений.

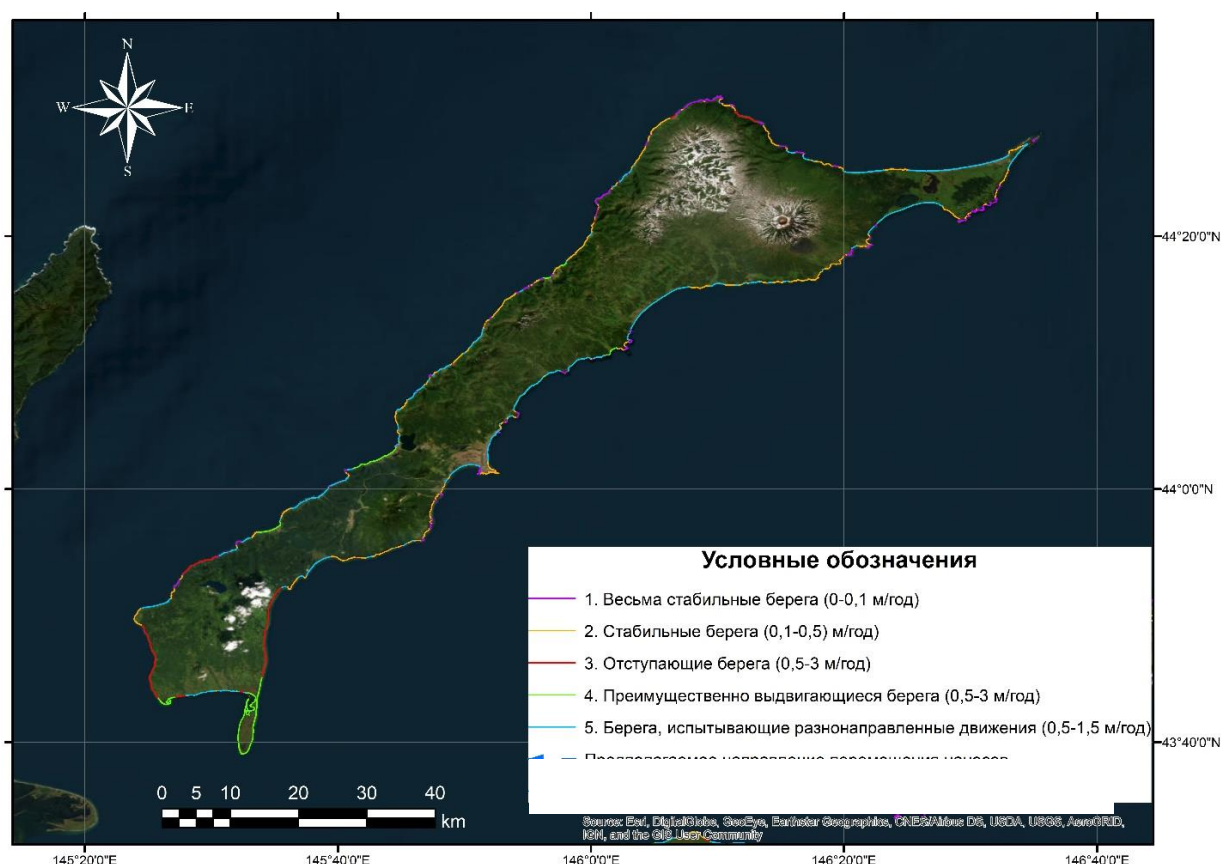


Рис. 2. Морфодинамика берегов острова Кунашир с 1980 по 2022 гг. (исходный масштаб 1:100000)

Заключение

Морфологические различия рельефа охотоморского и тихоокеанского побережий обусловлены тем, что восточный (тихоокеанский) макросклон острова приурочен к мелководной междуговой впадине, которая, как и Малая Курильская гряда, препятствуют длительному разгону волн и абразии выступов берегов, сформированных извержениями четвертичных вулканических построек. Западный (охотоморский) макросклон приурочен к глубоководной котловине (тыловому рифту), осложнённой вулканическими аппаратами. Всё это нашло отражение в расчленённости рельефа тихоокеанского побережья (и охотоморского по бровке шельфа).

Установлено, берега за последние 40 лет в разных частях острова испытывали разнонаправленные движения. Максимальное выдвигание испытали аккумулятивные берега заливов охотоморской стороны острова, а также тихоокеанский берег п-ова Весловский, (в среднем около 1,5-2,5 м/год, локально до 4 м/год). В то же время выяснилось, что некоторые аккумулятивные по внешнему виду берега, в основном на тихоокеанской стороне острова, за последние 40 лет испытывали разнонаправленные движения – периоды размыва и

аккумуляции, вследствие мощных штормовых и цунамигенных размывов в 1994 и 2011 гг., поэтому итоговые скорости их выдвигания составили в среднем 0,5-1,5 м/год. Наибольшее отступление берегов зафиксировано на участках абразионных берегов, выработанных в рыхлых и слабосцементированных пирокластических отложениях (2-2,5 м/год, локально до 4 м/год). Устойчивые берега практически не изменили положения береговых линий.

В шести наиболее крупных заливах и бухтах с наибольшими изменениями аккумулятивных берегов были выявлены направления перемещения наносов. Наличие активного вдольберегового перемещения наносов может привести к заносимости причальных сооружений при создании инфраструктуры.

Благодарность

Автор выражает признательность Русскому географическому обществу и Министерству обороны за организацию и содействие в проведении исследований.

Список литературы

1. Геолого-геофизический атлас Курило-Камчатской островной системы / ред. К.Ф. Сергеев, М.Л. Красный. – Л.: ВСЕГЕИ, 1987. – 36 л.
2. Шевченко Г.В., Лоскутов А.В., Кайстренко В.М. Новая карта цунамиопасности побережья Южных Курильских островов // Геосистемы переходных зон. – 2018. – т. 2. – № 3. – с. 225-238.
3. Шикотанское землетрясение и цунами 4 (5) октября 1994 года. Хроника событий, анализ последствий и современное состояние проблемы: сборник статей / Отв. ред. Б.В. Левин. Южно-Сахалинск. ИМГиГ ДВО РАН. – 2014. – 114 с.
4. Ионин А.С., Каплин П.А., Медведев В.С. Классификация типов берегов земного шара (применительно к картам физико-географического атласа мира) // Тр. океанографич. комиссии. – 1961. – т. 12. – с. 94-108.
5. Лоция Охотского моря. Выпуск 1. Южная часть моря. УНиО МО РФ. – 2018. – 390 с.
6. Атлас Курильских островов. М.: Владивосток: ИПЦ “ДИК”. – 2009. – 516 с.

УДК 551.89

Рубрика 38.43.19

РЕКОНСТРУКЦИЯ УСЛОВИЙ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ВОСТОЧНОЙ И ЮЖНОЙ ЧАСТЯХ КУРШСКОГО ЗАЛИВА В ГОЛОЦЕНЕ

RECONSTRUCTION OF THE SEDIMENTATION CONDITIONS IN THE EASTERN AND SOUTHERN PARTS OF THE CURONIAN LAGOON IN THE HOLOCENE

Моданова Елизавета Вадимовна¹, Чернова Ирина Геннадьевна², Румянцева Наталья Алексеевна^{3,4}, Ладыгина Анастасия Андреевна^{5,6}, Пономаренко Екатерина Петровна⁷, Кулешова Любовь Александровна⁷

¹ Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

³ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург

⁴ ФГБУ ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург

⁵ НПО Институт устойчивых инноваций, Ярославль

⁶ Ярославский государственный технический университет, Ярославль

⁷ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Modanova Elizaveta Vadimovna¹, Chernova Irina Gennadievna², Rummyantseva Natalia Alekseevna^{3,4}, Ladygina Anastasia Andreevna^{5,6}, Ponomarenko Ekaterina Petrovna⁷, Kuleshova Lyubov Alexandrova⁷

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

³ Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg

⁴ FSBI VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg

⁵ NGO Institute of Sustainable Innovation, Yaroslavl

⁶ Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl

⁷ Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow

Введение

Куршский залив, расположенный в юго-восточной части Балтийского моря, представляет собой мелководную и пресноводную лагуну, соединенную с морем узким Клайпедским проливом. Узкая одноименная коса отделяет залив от Балтийского моря [Гуделис, 1959]. Изучение осадочных разрезов, отобранных в основании Куршской косы и в Куршском заливе, необходимо для понимания условий формирования и эволюции бассейна Юго-Восточной Балтики. Благодаря высоким скоростям осадконакопления разрезы донных отложений залива представляют собой подробные архивы данных об изменении палеогеографических

обстановок голоцена. На сегодняшний день исследования, посвященные развитию залива в голоцене, являются недостаточными, а палеогеографическое описание прибрежных и подводных ландшафтов – неполным.

Цель настоящей работы – реконструкция палеоэкологических условий в восточной и южной частях Куршского залива в среднем-позднем голоцене.

Материалы и методы исследования

Материалом исследования послужили колонки донных осадков ВИП_1К (54° 57.73' с.ш., 20° 34.33' в.д.), ВИП_2К (54° 55.00' с.ш., 21° 02.15' в.д.), ВИП_3К (55° 04.20' с.ш., 21° 06.00' в.д.), ФНТП_8К (55° 13.23' с.ш., 21° 14.47' в.д.), отобранные на четырех станциях в Куршском заливе в экспедиции Плавающего Университета БФУ им. И. Канта в рамках проведения VI Международной летней школы «Береговая зона моря: исследования, управление и перспективы» в июле 2023 г. (Рис. 1). Донные осадки получены с помощью малой (90 см) герметичной геологической трубки (конструкции аналогичной трубке Ниемисте). Особенность пробоотборника заключается в получении ненарушенного верхнего слоя осадка – без взмучивания и размыва придонного слоя.

Колонка ВИП_1К (длина 48 см) отобрана в юго-западной части Куршского залива, у корня Куршской косы, на глубине 2.80 м; колонка ВИП_2К (длина 46 см) – в юго-восточной части залива на глубине 3.90 м, в устье реки Деймы; колонка ВИП_3К (длина 16 см) – в восточной части залива на глубине 4.80 м; колонка ФНТП_8К (длина 26 см) – в северо-восточной части залива на глубине 3.80 м, в устье реки Неман. На борту судна было выполнено фотографирование и подробное литологическое описание отложений, включающее определение цвета осадка по шкале Munsell Soil Color, текстуры, наличия включений. После описания колонки были непрерывно разделены на образцы мощностью от 1 см в верхней части разреза до 10 см у дна.

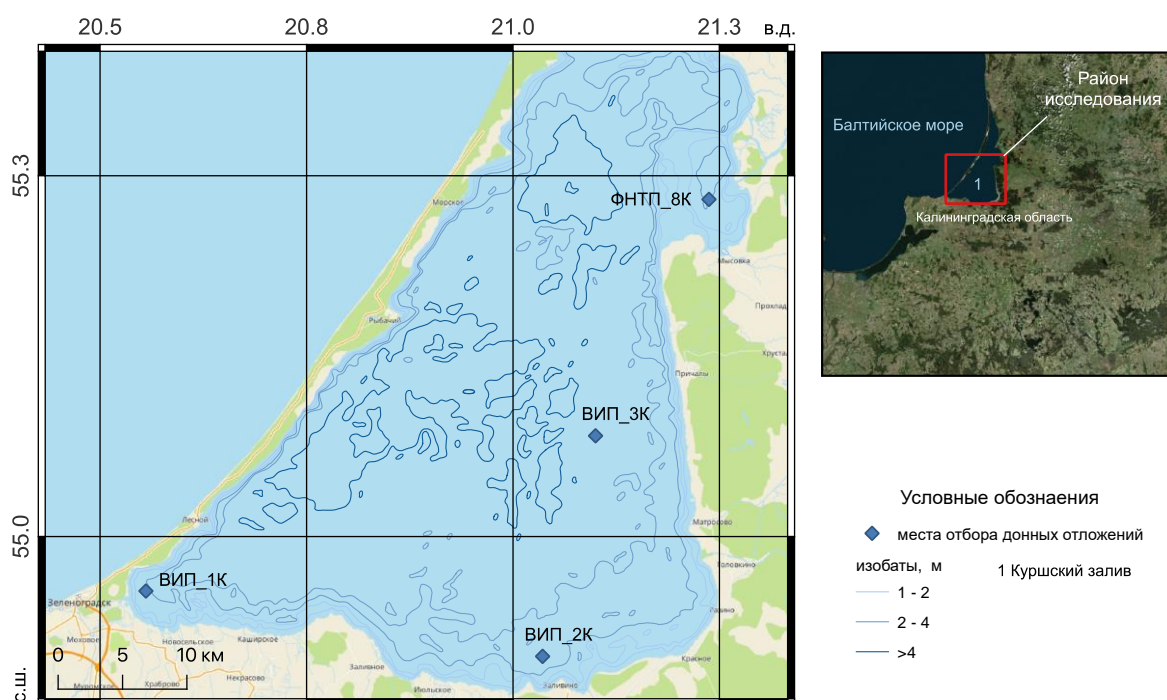


Рис. 1. Карта-схема исследуемого района с указанием расположения станций отбора колонок.

Потери при прокаливании

Для определения величины потерь при прокаливании (ППП) примерно 1 грамм сухого осадка помещали в фарфоровый тигель и сжигали в муфельной печи при 550 °С в течение 3 часов, далее пробу повторно взвешивали. ППП рассчитывали как потерю веса от первоначального значения в процентах.

Магнитная восприимчивость

Измерение магнитной восприимчивости проводилось при помощи системы Barington MS3 и точечного поверхностного датчика Bartington MS2E с шагом от 1 см в верхней части разреза до 10 см у дна. Пробы анализировали во влажном состоянии.

Показатели магнитной восприимчивости применяются в качестве косвенных индикаторов потоков терригенных частиц на дно и процессов диагенеза в осадках [Frederichs et al., 1999]. Также показатель магнитной восприимчивости чувствителен к содержанию влаги в осадке: при повышении обводненности осадка значения магнитной восприимчивости снижаются. Таким образом, вариации значений магнитной восприимчивости могут отражать различные режимы осадконакопления, интенсивность придонных течений в прошлом, а также могут служить инструментом для региональных стратиграфических подразделений [Kuleshova et al., 2022].

Влажность осадка

Для определения влажности пробы были взвешены до и после сушки при комнатной температуре. Влажность рассчитывали как потерю веса от первоначального значения в процентах.

Анализ макроостатков

Анализ заключался в определении и подсчете хорошо сохранившихся целых раковин моллюсков, остатков растений, организмов, а также ракушечного детрита под стереоскопическим микроскопом МБС-10. Анализ выполнен с использованием просеянной влажной фракции >250 мкм.

Результаты

Литология донных отложений

Донные отложения в районе исследования представлены илами оливкового и серого цветов, а также черными торфосапропелями (рис. 2–5).

Верхний горизонт осадков колонки ВИП_1К мощностью 1 см представлен оливковым (5Y 4/3) наилком. Слой 1–13 см – гомогенным оливково-серым (5Y 4/2) пелитовым илом. Нижележащий слой песчанистого ила с вкрапленной текстурой можно разделить на две части по изменению цвета: 13–30 см – темно-серый (5Y 3/1) и 30–35 см – очень оливково-серый (5Y 3/2), насыщенный детритом. Начиная с 25 см и ниже осадок уплотняется, и встречаются целые раковины моллюсков. В нижней части колонки (35–47 см) вскрыт черный (5Y 2.5/1) торфосапропель комковатой текстуры.

Верхний сантиметр осадков колонки ВИП_2К представлен наилком оливкового (5Y 4/3) цвета. В нижележащем слое 1–8 см наблюдается оливково-серый (5Y 4/2) гомогенный алевропелитовый ил с включениями детрита. Далее в интервале 8–25 см встречается темный оливково-серый (5Y 3/2) песчанистый ил с включениями детрита и с микровключениями черного цвета. Слой 25–30 см представлен черным песчанистым илом (детритовым), в интервале 30–40 см количество детрита уменьшается до единичных включений. Нижний слой осадка 40–46 см сложен черным (5Y 2.5/1) пелитовым илом.

Первый сантиметр колонки ВИП_3К состоит из оливкового (5Y 4/3) ила. Во время отбора из воды на поверхность осадка осаждалась зеленая органическая взвесь. Интервал 1–9 см представлен оливковым (5Y 4/3) алевропелитовым илом. В нижележащем слое 9–11 см осадок постепенно переходит в оливково-серый (5Y 4/2) песчанистый ил с включениями детрита. Нижний слой в диапазоне 11–16 см сложен черным (5Y 2.5/1) песчанистым илом.

Верхний слой колонки ФНТП_8К гомогенного пелитового ила можно разделить на два интервала относительно изменения цвета: 1–4 см оливковый (5Y 4/3) и 4–9 см оливково-серый (5Y 4/2) илы, на 8 см заметна крупная область черных ракушек. Интервал 9–17 см сформирован оливково-серым (5Y 4/2) алевропелитовым илом. Далее по разрезу в интервале 17–22 см вскрыт черный (5Y 2.5/1) торфосапропель. Слой 22–25 см – оливково-серый (5Y 4/2) алевропелитовый ил с включением детрита. Нижний слой мощностью 1 см представлен торфосапропелью (5Y 2.5/1).

Анализ макроостатков

Среди целых раковин доминировали два вида: *Valvata piscinails* – брюхоногий моллюск, который обитает в условиях водоема «застойного» типа [Манаков, 2018]. *Dreissena polymorpha* – двустворчатый моллюск, который распространен в водоемах около заливов и устьев рек [Манаков, 2018].

В образцах донных отложений колонки ВИП_1К были обнаружены эфиппии (остатки ракообразных), створки остракод и ткани осоки/тростника в больших количествах, а также целые раковины моллюсков и их обломки. В интервале 13–35 см обнаружен детрит раковин *Valvata piscinails* и *Dreissena polymorpha*. Содержание целых раковин моллюсков *Valvata piscinails* и *Dreissena polymorpha* увеличивалось вниз по разрезу (в интервале 20–25 см найдено 34 целых раковины, в осадках 25–30 см и 30–35 см – 36 и 45 раковин соответственно). В интервале 20–30 см наблюдается увеличение вниз по разрезу количества створок остракод и остатков тканей тростника.

В колонке ВИП_2К встречаются целые раковины *Valvata piscinails* в интервале 25–30 см, детрит – в пределах от 8 см до 40 см. Единичные целые раковины *Valvata piscinails* и детрит в колонке ВИП_3К обнаружены в осадках горизонта 9–16 см. В интервале колонки ФНТП_8К, сложенном пелитовым илом, целые раковины *Valvata piscinails* обнаружены в линзе, на глубине 8 см, также целые раковины и детрит обнаружены на глубине 17–25 см. Раковины *Dreissena polymorpha* найдены в больших количествах в колонке ФНТП_8К ниже 8 см по всей длине разреза.

Магнитная восприимчивость

В нижнем слое колонки ВИП_1К (47–35 см) значения магнитной восприимчивости увеличиваются вверх по разрезу от -5×10^{-6} до 80×10^{-6} SI. В слое песчанистого ила (35–30 см) величина составляет 82×10^{-6} SI. В интервале 30–13 см наблюдается постепенное уменьшение значений от 50×10^{-6} до 18×10^{-6} SI. Показатели магнитной восприимчивости в верхнем горизонте колонки 13–1 см изменяются в пределах $0-20 \times 10^{-6}$ SI.

В колонке ВИП_2К значения магнитной восприимчивости меняются незначительно в пределах интервала 40–20 см. Затем на глубине 20 см данный показатель в слое песчанистого ила резко возрастает до 53×10^{-6} SI, а далее снижается до 30×10^{-6} SI. В верхних горизонтах (0–8 см) магнитная восприимчивость постепенно снижается до 10×10^{-6} SI.

Значения магнитной восприимчивости в нижних горизонтах колонки ВИП_3К варьируют в пределах от 116×10^{-6} (слой 11–16 см) до 50×10^{-6} SI (слой 9–11 см). В вышележащем интервале 9–1 см показатели постепенно уменьшаются, снижаясь в верхнем слое осадка до 10×10^{-6} SI.

В нижнем горизонте (22–26 см) колонки ФНТП_8К магнитная восприимчивость остается постоянной – 107×10^{-6} SI. Затем в слое торфосапропеля (20–22 см) показатель резко возрастает до 140×10^{-6} SI и в интервале от 20 см до 17 см постепенно снижается. В осадках, представленных алевропелитовым и пелитовым илами, начиная с 15 см и далее вверх по разрезу значения магнитной восприимчивости резко не изменяются и остаются в пределах $40–50 \times 10^{-6}$ SI. В верхнем горизонте, сложенном пелитовым илом (2–0 см), значения уменьшаются до 20×10^{-6} SI.

Потери при прокаливании

В нижнем горизонте колонки ВИП_1К (47–35 см) значения ППП уменьшаются вверх по разрезу от 77.3% до 32.6%. В вышележащем слое песчанистого ила (35–30 см) величина ППП составляет 13.5%. В интервале 30–13 см наблюдается постепенное повышение значений от 22.6% до 33.1%. Показатели ППП в верхнем горизонте пелитового ила (13–1 см) изменяются в пределах 40.6–46.9%.

В слое черного песчанистого ила колонки ВИП_2К (40–25 см) значения ППП уменьшаются вверх по разрезу от 49.5% до 29.5%. В интервале 25–8 см показатели ППП постепенно увеличиваются от 19.4% до 30.2%. В вышележащем гомогенном алевропелитовом иле (8–1 см) величина ППП колеблется в интервале 33.5–34.8%.

Нижний горизонт осадков колонки ВИП_3К (13–11 см) характеризуется низкой величиной ППП – 7.9%. В вышележащем слое песчанистого ила (11–9 см) величина ППП имеет значение 10.0%. В интервале 9–1 см показатели ППП увеличиваются в 2 раза по сравнению с нижележащими толщами и составляют 26.3–31.9%.

Нижний горизонт торфосапропеля колонки ФНТП_8К (26–25 см) имеет значение ППП 12.3%. Показатель ППП в вышележащем слое алевропелитового ила (25–22 см) составляет 18.9%. В интервале 22–17 см величина ППП уменьшается до 15.3%. В вышележащем слое (17–9 см) значения ППП изменяются в пределах 20.7–21.2%. Выше 9 см показатели ППП изменяются в интервале 21.1–22.6%.

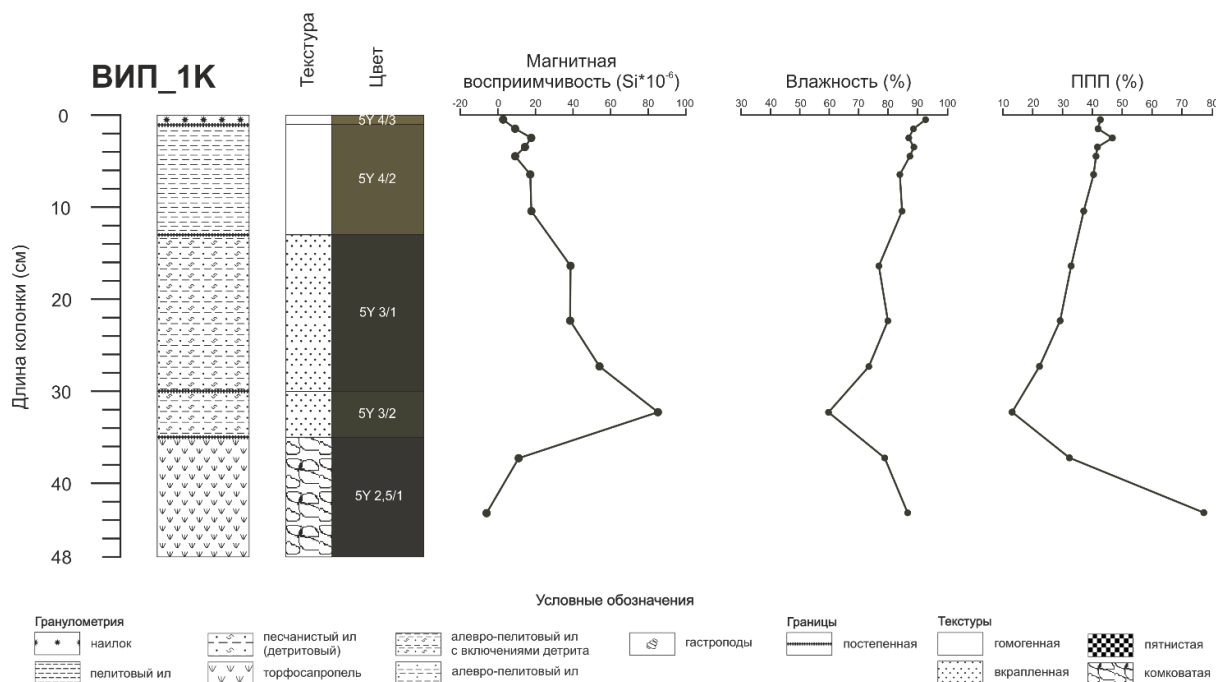


Рис. 2. Литологическое описание колонки ВИП_1К и вариации значений магнитной восприимчивости, влажности осадка и потерь при прокаливании (ППП). Цвета обозначены следующими кодами в соответствии с цветовой шкалой Munsell Soil Color: 5Y 4/3 –

оливковый, 5Y 4/2 – оливково-серый, 5Y 3/2 – темный оливково-серый, 5Y 2.5/1 – черный, 5Y 2.5/2 – черный.

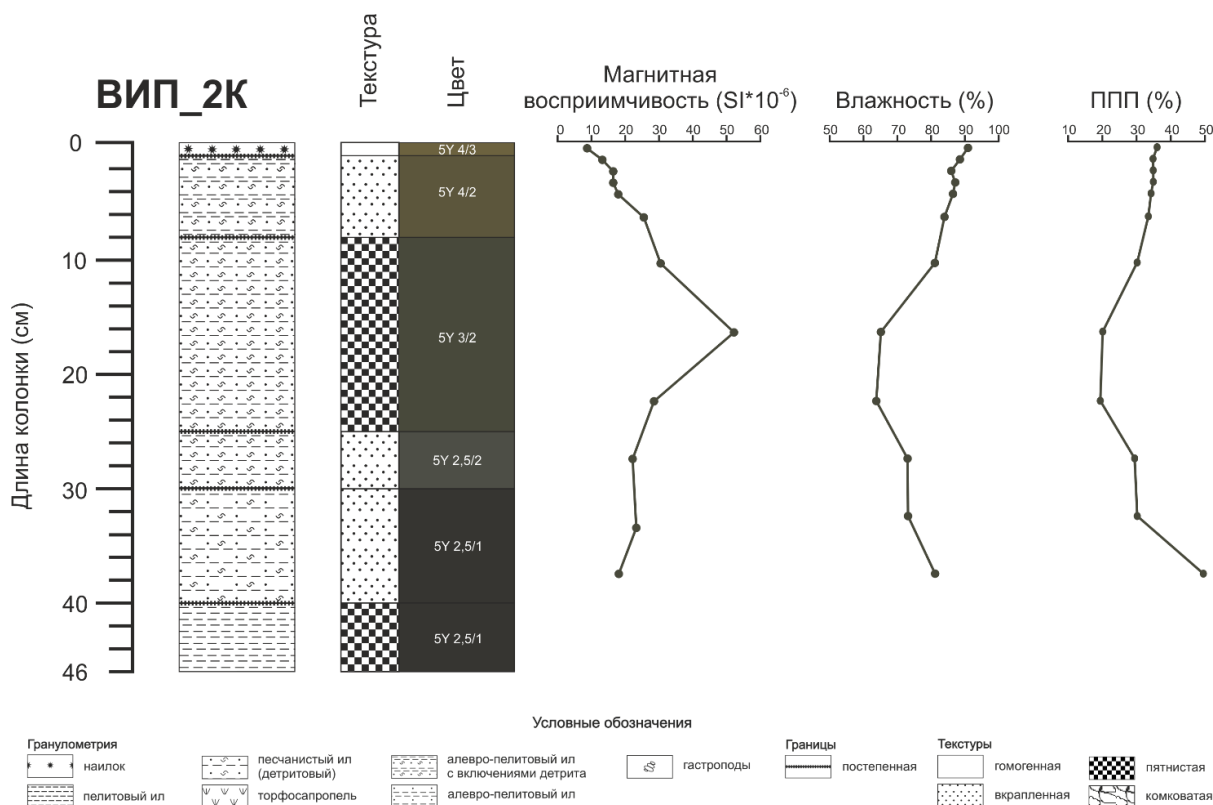


Рис. 3. Литологическое описание колонки ВИП_2К и вариации значений магнитной восприимчивости, влажности осадка и потерь при прокаливании (ППП). Расшифровка кодов цветов указана под рис.2.

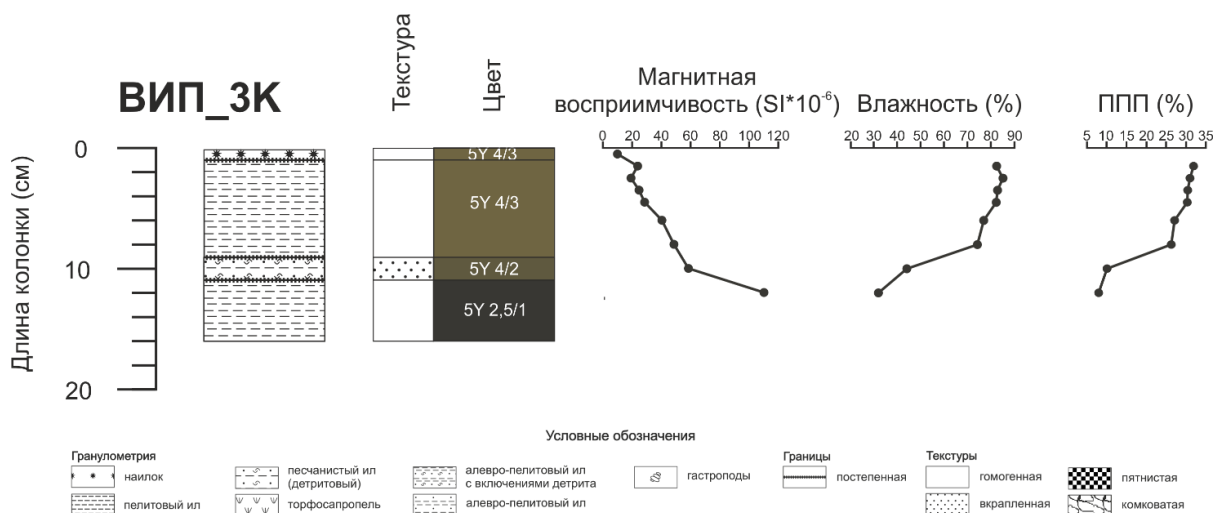


Рис. 4. Литологическое описание колонки ВИП_3К и вариации значений магнитной восприимчивости, влажности осадка и потерь при прокаливании (ППП). Расшифровка кодов цветов указана под рис.2.

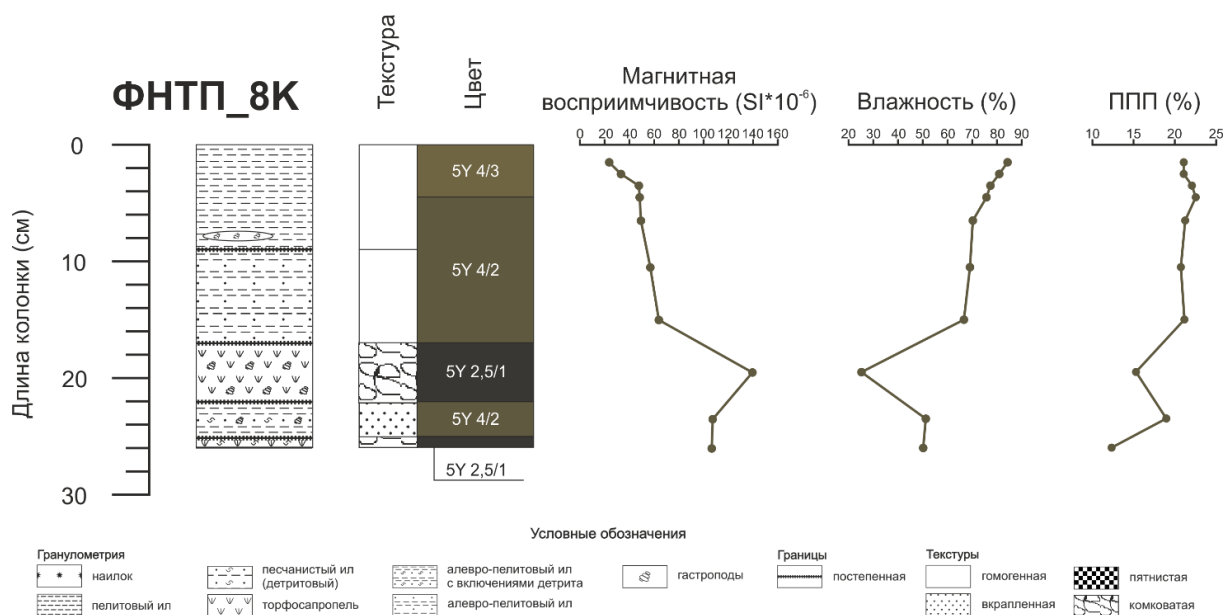


Рис. 5. Литологическое описание колонки ФНТП_8К и вариации значений магнитной восприимчивости, влажности осадка и потерь при прокаливании (ППП). Расшифровка кодов цветов указана под рис.2.

Обсуждение

Согласно опубликованным данным радиоуглеродного датирования донных отложений [Соснина и др., 2021; Druzhinina et al., 2023] нижний торфосапнопелевый горизонт колонок ВИП_1К (до 35 см) и ФНТП_8К (до 17 см) сформировался в период среднего голоцена – 6900–5800 кал. л.н. В это время осадконакопление происходило в прибрежно-континентальных условиях, районы отбора колонок представляли собой низинные участки суши с застойным бассейном, болотную экосистему [Соснина и др., 2021]. В колонке ФНТП_8К, расположенной в устье реки Неман, торфосапнопель переслаивается с алевропелитовым илом, который содержит большое количество раковин моллюсков. Последнее, по-видимому, связано с происходившими периодическими подтоплениями территории к востоку от Куршского залива. Торфосапнопелевые отложения в колонках сменяются на песчанистые и алевропелитовые илы, что говорит о смене условий осадконакопления из-за повышения уровня воды на данной территории. Большое количество раковин остракод и моллюсков указывает на существование мелководного пресного водоема с участками тростниковых зарослей, как следует из высокого содержания остатков тканей тростника и осоки.

Во всех исследованных колонках высокие значения ППП и, следовательно, повышенное содержание органического вещества в осадках говорит об общей эвтрофности бассейна. В нижних интервалах колонок ВИП_3К (16–9 см) и ФНТП_8К (17–26 см), отобранных в восточной части залива, значения ППП понижены, что может говорить о накоплении меньшего количества органического вещества из-за уменьшения продуктивности поверхностных вод ввиду возможного похолодания климата [Binczewska et al., 2017]. В осадках юго-западной (ВИП_1К) и юго-восточной (ВИП_2К) частей Куршского залива в интервалах 35–13 см и 46–8 см соответственно показатель ППП постепенно растет вверх по разрезу, что указывает на повышение продуктивности поверхностных вод, произошедшее одновременно с ростом уровня воды. Отсутствие слоистости в данных отложениях свидетельствует о вентиляции придонного слоя воды и отсутствии заморных условий. Мощность слоя песчанистого и алевропелитового илов в устье реки Деймы (ВИП_2К) почти в 2 раза больше, чем в других колонках, исследованных в настоящей работе, следовательно, скорость осадконакопления в данном районе была выше.

Исчезновение основной массы растительных остатков, детрита и раковин моллюсков, уменьшение размерности осадка (смена песчанистых и алевропелитовых илов пелитовыми илами) свидетельствуют об увеличении глубины водоема. Максимальная продуктивность поверхностных вод отмечается в южной части залива, судя по более высоким показателям ППП в осадках (колонки ВИП_1К и ВИП_2К).

Выводы

Комплексное исследование четырех колонок донных осадков, полученных в восточной и южной частях Куршского залива, позволило выполнить реконструкцию вариаций палеоэкологических условий в среднем-позднем голоцене и выявить три режима осадконакопления: болотная стадия с периодическими затоплениями территории, переходная стадия (мелководный водоем) и стадия залива.

Благодарности

Авторы благодарны организаторам экспедиции Плавучего университета в рамках VI Международной летней школы «Береговая зона моря: исследования, управление и перспективы» за проведение полевых работ. Авторы выражают благодарность Максиму Геннадьевичу Напреенко за помощь в определении макроостатков, Андрею Александровичу Гусеву за определение раковин моллюсков, а также Евгении Павловне Жолинской за помощь в проведении геохимических анализов.

Работа выполнена в рамках проектов климатического и экологического мониторинга Балтийского моря (ВИП ГЗ, соглашение №71-223/ВИПГЗ-23; ФНТП, госзадание № FZWM-2023-0004).

Список литературы:

1. Гуделис В.К. Геологические и физико-географические условия залива Куршю-Марес и территории, окаймляющей. Вильнюс, 1959. С. 7–41.
2. Манаков Д.В. Отчет о научной исследовательской работе. Тема: Атлас пространственного распределения водных брюхоногих моллюсков (Mollusca, Gastropoda) Калининградской области (Россия). – Калининград, 2018, 20 с.
3. Соснина И.А., Напреенко-Дорохова Т.В., Напреенко М.Г., Касперовичене Ю., Каросене Ю. Видовой состав диатомовых водорослей (Bacillariophyta) голоценовых отложений Куршского залива // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2021. № 1. С. 82–94.
4. Binczewska A., Moros M., Polovodova-Asteman I. et al. Changes in the inflow of saline water into the Bornholm Basin (SW Baltic Sea) during the past 7100 years — evidence from benthic foraminifera record // *Boreas*. 2017. Vol. 47. № 1. P. 297–310.
5. Druzhinina O., Napreenko M., Napreenko-Dorokhova T., Golyeva A., Bashirova L. Water Level Fluctuations in the Middle and Late Holocene in the Curonian Lagoon, Southeastern Baltic: Results of the Macrofossil and Phytolith Analyses // *Hydrology*. 2023. Vol. 10. P. 1–11.
6. Frederichs T., Bleil U., Däumler K. et al. The magnetic view on the marine paleoenvironment: Parameters, techniques and potentials of rock magnetic studies as a key to paleoclimatic and paleoceanographic changes. In: Fischer G., Wefer G. (Eds.). *Use of Proxies in Paleoclimatology: Examples from the South Atlantic*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 1999. P. 575–599.
7. Kuleshova, L.A., Bashirova, L.D., Matul, A.G., Andersen, N., & Ponomarenko, E.P. Changing sea-surface and deep-water conditions in the southern Cape Verde Basin during the mid-Pleistocene to Holocene // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2022. Vol. 594. P. 110921.

УДК 552.08

Рубрика 38.15.03

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ (КТ) ПРИ ИЗУЧЕНИИ МОРСКИХ ОСАДКОВ (НА ПРИМЕРЕ ВЕРХНЕЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ)

APPLICATION OF THE COMPUTED TOMOGRAPHY (CT) METHOD IN THE STUDY OF MARINE SEDIMENTS (ON THE EXAMPLE OF UPPER QUATERNARY SEDIMENTS OF THE KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA)

Косоватова Татьяна Александровна^{1,2}, Корост Светлана Радиковна^{1,2}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

² ООО «Деко-сервис», Москва

Kosovatova Tatiana Aleksandrovna^{1,2}, Korost Svetlana Radikovna^{1,2}

¹ MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow

² Deko-service LLC, Moscow

Введение

Отбор проб морских осадков в ходе геолого-геофизических работ на акваториях проходит по стандартной, выработанной годами схеме. После анализа геологических и геофизических данных определяются координаты точек для донного пробоотбора. В зависимости от технических особенностей судна, в дрейфе или при динамическом позиционировании производят спуск пробоотборника за борт. После того, как было зафиксировано проникновение морских осадков в пробоотборник, его поднимают на палубу и аккуратно извлекают материал. Полученный керн разрезают вдоль на две половины. Одну половину фотографируют, измеряют длину, описывают, то есть, проводят полевую документацию. Из другой половины берут пробы на анализы в стационарных лабораториях, а также с помощью доступных приборов определяют дополнительные параметры (например, температуру, Eh, pH, модуль сдвига и др.). После окончания работ с данным керном, его утилизируют (выбрасывают за борт).

Но существует другой подход, когда поднятый на палубу материал не извлекают из пластиковой трубы, а качественно упаковывают и транспортируют в стационарные лаборатории для последующих исследований, например, методом компьютерной томографии (КТ).

Метод КТ основан на способности вещества в разной степени поглощать проходящее через него рентгеновское излучение. Уровень излучения, поглощенного объектом, фиксируется на детекторе, которым оснащены все томографы, в виде теневых проекций. основополагающий принцип КТ заключается в получении множества теневых проекций с различных углов обзора образца. На следующем этапе математической реконструкции и первичной обработке данных проводится пересчет набора теневых проекций в набор плотностных сечений (графические срезы в градациях серого) отдельно для каждого изучаемого объекта. Полученные данные позволяют отображать внутреннее строение объектов, строить трехмерные модели, делать замеры морфометрических параметров и различные расчеты.

Яркость на томографических изображениях, то есть цвет в градациях серого, зависит от плотности и атомного числа материала образца. Важна также энергия самих рентгеновских лучей: чем она меньше, тем лучи чувствительнее к разнице в составе образца. При работе с полноразмерным керном гамма-лучи в первую очередь реагируют на изменение объемной плотности.

Изучение неконсолидированных донных отложений методом КТ позволяет неинвазивным способом (без разрушения) получить информацию об особенностях внутреннего строения: текстуре, различных нарушениях, наличии и характере включений. В результате анализа данных КТ можно провести точечный целенаправленный отбор проб на дополнительные анализы. Кроме того, у исследователей навсегда сохранится цифровой облик изучаемого объекта, к которому можно будет неоднократно возвращаться в будущем при появлении новых идей, задач, технических возможностей и т.д.

В работе представлены материалы, собранные в ходе учебных практик по условиям осадконакопления в пределах Кандалакшского залива Белого моря. Это субполярный окраинный шельфовый водоем на севере России, относящийся к акватории Северного Ледовитого океана. Белое море является молодым, его образование связано с деятельностью ледника последнего четвертичного оледенения – Валдайского. Около 11 тысяч лет назад последние крупные льды растаяли, и в регионе установился нормальный морской режим осадконакопления. В разрезе комплекс моренных отложений перекрыт ледниково-озерными, ледниково-морскими, переходными и морскими отложениями.

На примере отдельных разрезов я продемонстрирую преимущества КТ в качестве дополнительного инструмента при интерпретации условий осадконакопления.

1. Текстуальный анализ

Осадконакопление в разных частях морских бассейнов происходит неравномерно, что обусловлено удаленностью от источника сноса и развитием трансгрессивно-регрессивных циклов. Поэтому в разрезе мы наблюдаем чередование осадков разного гранулометрического состава – песок, алеврит, пелит и смешанные разности. Данные, полученные методом КТ, отражают изменение объемной плотности и минерального состава. Если состав изучаемых осадков примерно одинаковый во всех фракциях, то объемная плотность меняется. Благодаря этому на срезах КТ элементы разреза разного гранулометрического состава различаются между собой (рис. 1). Например, глинистый ил часто обводненный, его объемная плотность понижена, и он обладает низким поглощением, а на срезах КТ имеет темно-серый цвет. С другой стороны, наличие обломочного материала повышает объемную плотность, в результате чего повышается степень поглощения рентгеновского излучения, и на срезах КТ прослой, насыщенные песчано-алевритовым материалом, имеют более светлые оттенки серого. А отдельные крупные включения гравия и гальки хорошо заметны благодаря своей высокой рентгеновской абсорбции относительно основной вмещающей массы, на срезах КТ они имеют светло-серый, белый цвет.

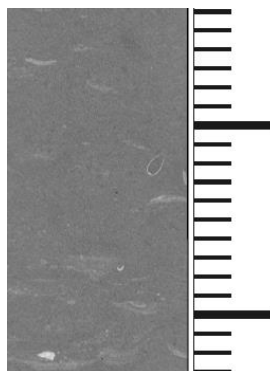


Рис. 1 Срез КТ, станция WS_2022_25G. Пелитовая основная масса (темно-серый цвет), песчано-алевритовая примесь в виде линзочек (светло-серый цвет), включения гравия (белый цвет) и обломка раковины (светло-серый цвет)

Благодаря этому, на срезах КТ можно различать элементы разного гранулометрического состава (линзы, слои и прослой), разнообразные типы слоистости, границы, нарушения, включения. Все это вкуче составляет текстуру осадка, одну из важнейших его характеристик. Метод КТ хорош для текстурного анализа именно морских нелигитифицированных отложений, в которых не всегда возможно определить элементы текстуры при первичном описании.

2. Газонасыщенность

В Кандалакшском заливе в локальных пониженных структурах, выполненных алевропелитовым и пелитовым материалом, созданы благоприятные условия для развития и жизнедеятельности микроорганизмов (метанотрофные микроорганизмы и сульфатредуцирующие бактерии), которые в процессе своей жизнедеятельности образуют метан (CH_4) и сероводород (H_2S). Осадки, обогащенные газами, хорошо видны на сейсмоакустических профилях по смене осей синфазности и т.н. «ярким пятнам». Донное опробование также подтверждает наличие газов. При набортном описании такие осадки имеют черный цвет, резкий запах сероводорода, характеризуются следами газовыделения (трещины, пузырьки, шипение) на свежем срезе (рис. 2). С помощью гравитационной трубы было опробовано несколько точек с газонасыщенными осадками. Результаты анализов показали преобладание углеводородного компонента – метана, концентрация которого изменяется от первых ppm до 36.8%, но присутствуют и этан с концентрацией до 5 ppm, и другие высокомолекулярные газообразные УВ.



Рис. 2 Фотография, фрагмент станции WS_2018_14G. Осадки со следами газовыделения

При подъеме гравитационной трубы со дна на борт нарушаются естественные P-T условия, что приводит к улетучиванию газа. Однако следы его присутствия остаются. Они хорошо видны на КТ в виде множества хаотично расположенных субвертикальных щелевидных полостей (рис. 3). Этим методом, к сожалению, нельзя определить состав и концентрацию газов, но можно с уверенностью говорить, что осадки в данной точке были газонасыщены.

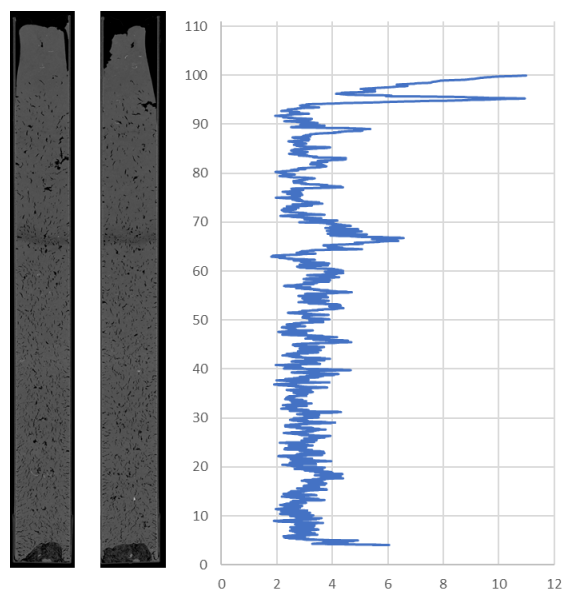


Рис. 3 Срезы КТ и график пористости, станция WS_2018_40G

3. Биотурбация

В верхнем придонном слое морского грунта ведут активную жизнедеятельность различные организмы – биотурбаторы, интенсивно нарушающие седиментационную текстуру осадка. Например, илоеды, зарываясь в норы, перерабатывают осадочный материал и обогащают его своим секретом, который на последующих стадиях преобразования осадочного вещества может стать геохимическим барьером. Из-за этого аутигенные процессы в ходах илоедов и во вмещающей толще протекают по-разному. Следы биотурбации в каменных ядрах отчетливо видны, а в еще нелитифицированных осадках неясные, их легко можно пропустить при набортном описании. Полости, оставленные илоедами, заполнены обводненным осадком, который будет иметь меньшую объемную плотность по сравнению с основной вмещающей массой. Поэтому на срезах КТ ходы илоедов хорошо видны на общем фоне благодаря пониженной рентгеновской абсорбции (рис. 4).

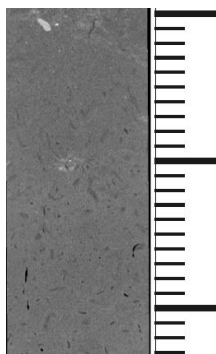


Рис. 4 Срез КТ, станция WS_2022_14G. Следы биотурбации (темно-серый цвет на фоне основной серой массы)

4. Фаунистический анализ

При набортном описании происходит визуальный осмотр лишь одного продольного среза, из-за чего можно пропустить любые включения, в том числе фаунистические остатки. Методом КТ просвечивается весь керн целиком, в объеме, что позволяет увидеть все обломки и целые раковины. Кроме того, по данным КТ можно построить модели отдельных фаунистических находок и в случае хорошей сохранности даже определить их (рис. 5).

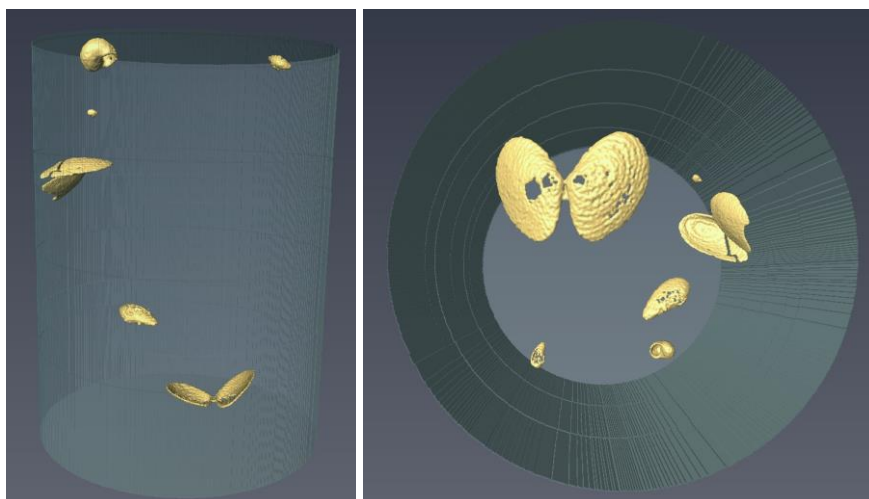


Рис. 5 Модель, построенная по данным КТ, станция WS_2022_25G. Гастроподы и двустворчатые моллюски

5. Оползневые текстуры

Пролив Великая Салма, откуда были взяты следующие образцы, является долиной с довольно крутыми бортами, в пределах которых, как и в целом в Кандалакшском заливе, активно развиты гравитационные процессы. Анализ набортного описания кернов за прошлые годы показал, что результаты этих гравитационных процессов ни разу не были зафиксированы, так как на свежих срезах морских осадков их очень сложно обнаружить в силу разных причин. Например, описание проводится лишь для одного продольного среза, он имеет маленькую площадь и т.д. На результатах КТ же хорошо видны различные нарушения текстурных элементов – микросбросы, оползневые текстуры и др. На рисунке дан пример слоистого разреза (рис. 6). Слои выделяются благодаря разной степени рентгеновской абсорбции. В пределах отдельных слоев наблюдаются разрывные нарушения в виде сбросов или взбросов,

причем выше- и нижележащие слои не прерываются. Такую картину можно интерпретировать как развитие оползневых процессов на склоне.

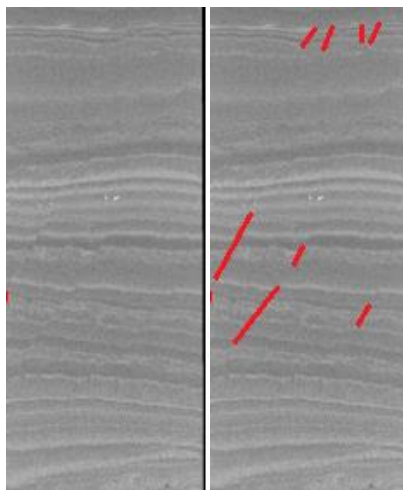


Рис. 6 Срез КТ, станция WS_2022_17G. Микросбросы

6. Эрозионные границы

Эрозионные границы в разрезе являются очень важным признаком для геолога при реконструкции условий осадконакопления. В отличие от довольно четких границ в литифицированном керне, при набортном описании морских осадков эрозионные границы зачастую можно пропустить вообще или не понять, где они начинаются. Метод КТ позволяет зафиксировать все изменения нормального чередования слоев – от крупных «карманов» до малозаметных эрозионных границ в тонких прослоях (рис. 7).

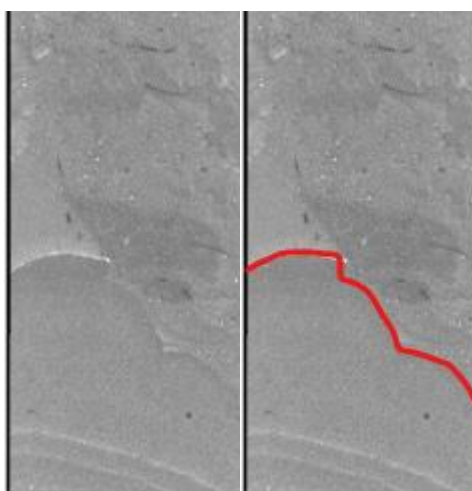


Рис. 7 Срез КТ, станция WS_2022_22G. Эрозионная граница

7. Леночные глины

Ленточные глины, которые широко развиты в пределах Белого моря, Онежского озера и других водоемов, чье развитие связано с деятельностью ледника, образуются в результате сезонной смены условий. Летом, в период относительно интенсивного таяния ледника,

увеличивается мощность потоков и количество приносимого обломочного материала. Тогда отлагается слой песчанистых отложений (светло-серые прослои на рис. 8). Зимой же оседает тонкий глинистый материал (темно-серые прослои на рис. 8). В Кандалакшском заливе ленточные глины характерны для нерасчлененных ледниково-морских и ледниково-озерных отложений. На данных КТ такие отложения ясно видны по чередованию прослоев с разной рентгеновской абсорбцией (рис. 8).

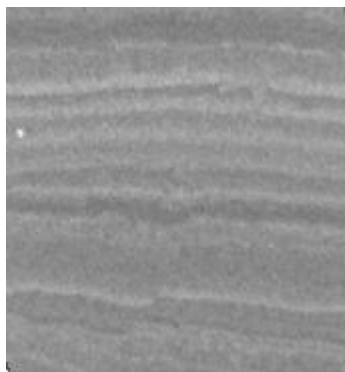


Рис. 8 Срез КТ, станция WS_2022_17G. Прослои ленточных глин

Заключение

Метод компьютерной томографии – не замена каким-либо иным геологическим методам. Это дополнительный инструмент, имеющий свои преимущества и недостатки. Он особенно хорош для изучения нелитифицированных морских осадков. Текстуальный и фаунистический анализы, способность фиксировать нарушения осадка, чередования прослоев и различные границы делают КТ важным и полезным методом для интерпретации условий осадконакопления и выявления особенностей отложений.

Список литературы:

1. Марков К.К. Изучение ленточных глин с геохронологической точки зрения // Природа. 1927. № 9. С. 679-696 : ил. : карт.
2. Рыбалко А.Е., Журавлев В.А., Семенова Л.Р. Токарев М.Ю. Четвертичные отложения Белого моря и история развития современного беломорского бассейна в позднем неоплейстоцене-голоцене // Система Белого моря. Т. IV. Процессы осадкообразования, геология и история. М.: Научный мир, 2017. С. 16–84.
3. VAN GEET, M., LAGROU, D. & SWENNEN, R. 2003. Porosity measurements of sedimentary rocks by means of microfocus X-ray computed tomography. In: MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M. & JACOBS, P. (eds) Applications of X-ray Computed Tomography in the Geosciences. Geological Society, London, Special Publications, 215, 51-61.
4. <https://neftegaz.ru/science/general-questions/331812-primenenie-rentgenovskoy-kompyuternoy-tomografii-dlya-izucheniya-svoystv-gornyx-porod/>

УДК 551.465

Рубрика 37.25.27

ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ВО ВЗВЕСИ ПРИУСТЬЕВОЙ ЗОНЫ
СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ: СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

FORMS OF OCCURRING OF METALS IN THE SUSPENDED SEDIMENTARY MATTER
OF THE NORTHERN DVINA ESTUARINE ZONE: SEASONAL VARIABILITY

**Коченкова Анастасия Игоревна¹, Стародымова Дина Петровна¹, Лохов Алексей
Сергеевич¹**

¹*ИО имени П. П. Шишова РАН, Москва*

**Kochenkova Anastasiya Igorevna¹, Starodymova Dina Petrovna¹, Lokhov Alexey
Sergeevich¹**

¹*Shirshov IO of the RAS, Moscow*

Введение

Речной сток является важным механизмом поступления загрязняющих веществ в окружающую среду морей Арктики. Поступления осадочного вещества в бассейн Белого моря хорошо изучено в рамках программы междисциплинарных исследований «Система Белого моря», начиная с 2000 г. Северная Двина – самая крупная река, впадающая в Белое море. Её вклад в поступление растворенных и взвешенных веществ в бассейн Белого моря составляет более 50% растворенных и взвешенных веществ в его бассейн. Для детального изучения геохимии процессов в устьевой области реки и зоне смешения речных и морских вод (области маргинального фильтра [Lisitsyn, 1995]) с 2015 г. проводятся ежемесячные круглогодичные отборы проб воды и взвеси в нижнем течении реки. Ежемесячный отбор проб позволяет получить надежные результаты в условиях сильной сезонной изменчивости стока реки и концентраций всех изучаемых элементов и компонентов [Гордеев и др., 2020; Гордеев и др., 2021; Коченкова и др., 2018].

Устье Северной Двины – крупный транспортно-промышленный узел Архангельска, Северодвинска, Новодвинска, оказывающий значительную антропогенную нагрузку на ее эстуарную зону, а речной сток является главным источником загрязнения Белого моря. Воздействие и потенциальный риск поступающих в среду загрязнителей (в том числе тяжелых металлов) в многом определяется их формами нахождения, от которых зависит их физико-химическая подвижность, потенциальная биологическая доступность, а, следовательно, и токсичность элементов в природных объектах.

Данные и методы

Фактическим материалом для написания работы послужили результаты анализа 80 вытяжек физико-химических форм нахождения химических элементов в 20 пробах взвеси р. Северная Двина. Пробы отбирались с поверхности ежемесячно в устьевой зоне реки с 2-х станций: Яхт-клуб и порт Экономия (Рис. 1). Из каждой пробы объемом от 200 до 800 л воды после отстаивания был декантирован осадок, который затем высушивался. Такой способ отбора позволяет получить достаточные навески взвеси в ряде случаев до нескольких граммов. Для

определения форм нахождения металлов были изучены пробы, отобранные на ежемесячной основе с января по декабрь 2016 года, а также 8 проб в разные сезоны 2015, 2017, 2018 гг. с массой навески от 0,4 до 1,0 г, что является достаточным для проведения серии последовательных химических выщелачиваний.

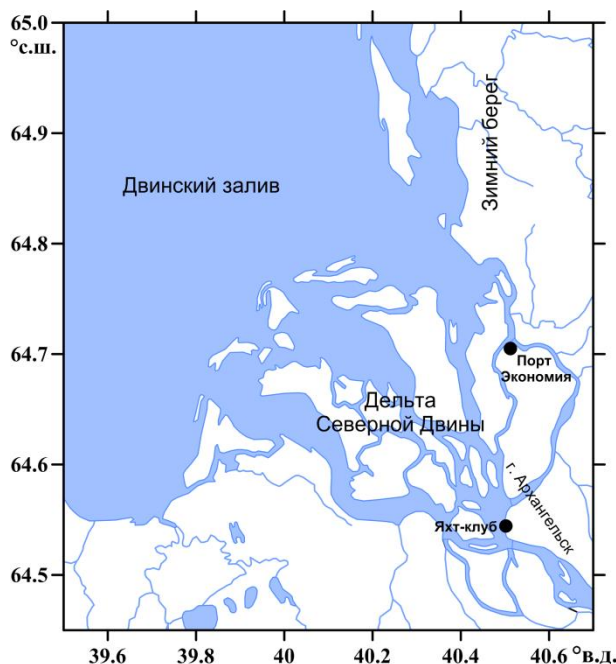


Рис. 1. Расположение станций отбора проб воды: станция Яхт-клуб (I) и порт Экономия (II)

Последовательное химическое выщелачивание выполнялось по схеме, применявшейся и ранее [Демина и др., 1978; Демина и др., 2017], в том числе, в работе [Гордеев, Шевченко, 2012], где показаны результаты фазового анализа для взвеси р. Северная Двина в весенний и летний периоды. Главный принцип такого фракционирования элементов заключается в том, что каждый последующий выщелачивающий реагент должен быть либо сильнее предыдущего по химическому воздействию, либо иметь другую природу и воздействовать только на определенные компоненты взвеси.

Были выделены следующие формы металлов во взвеси:

Ф1 – Адсорбционно-обменный комплекс и карбонаты. Рассматривается способность металлов к сорбционно-десорбционным процессам на различных осадкообразующих компонентах (глинистые минералы, гуминовые вещества) и связь металлов с карбонатами. Реагентом был ацетатный буфер (ацетат натрия CH_3COONa).

Ф2 – Fe-Mn окси-гидроксиды. Включает те фракции элементов, которые связаны с аморфными гидроксидами Fe и Mn, являющиеся хорошими сорбентами для микроэлементов. К отцентрифугированному влажному осадку после 1-й экстракции добавляется 10 мл смеси 25% гидроксилamina ($\text{HN}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) и 35% уксусной кислоты (CH_3COOH) (реагент Честера [Chester at al., 1967]).

Ф3 – Органическое вещество и/или сульфиды. Рассматриваются микроэлементы, связанные с различными формами органического вещества – накопленные живыми организмами, продукты разложения органики (гуминовые и фульвокислоты). В качестве сильного окислителя органики используется пероксид водорода (H_2O_2) с добавлением азотной кислоты (30% $\text{H}_2\text{O}_2 + 0.04\text{M HNO}_3$).

Ф4 – Остаточная (иначе кристаллическая или силикатно-обломочная). В эту фракцию попадают металлы, находящиеся в составе наиболее прочных к растворению компонентов осадочного материала – глинистых и обломочных минералов. Для извлечения этой формы применяется полное кислотное разложение с помощью смеси $\text{HNO}_3 + \text{HF}$.

Для контроля качества анализа насодержания исследуемых микроэлементов. Контроль точности анализа проводили с использованием международных стандартных образцов: GSD-2 (речной аллювий), BCR-277R (приустьевые отложения) и NIST 2702 (морской осадок).

Концентрации Al, Mn, Cu измерялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) на приборе “Agilent 7500a” (INTERLAB, США), а концентрация Fe – методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС) на спектрометре «КВАНТ-2А» (фирма КОРТЭК, Россия).

Результаты и обсуждения

Первые три формы позволяют оценить вклад геохимически подвижных металлов, тогда как четвертая является геохимически инертной (литогенной) формой. Подвижные формы могут трансформироваться в речной воде, они доступны биоте, тогда как инертные остаются в речном потоке практически без изменений.

Взятые для анализа 20 проб разделены на группы для сравнения сезонной изменчивости физико-химических форм 4 элементов (Al, Fe, Mn, Cu): зимний (n=5), период весеннего половодья (n=5), летняя межень (n=5), осенний период (n=5) (Рис. 2, Табл. 1). Применение в данной работе тех же реактивов, что и в более ранних работах, позволяет сопоставлять их между собой. Сравним полученные результаты с данными по 7 пробам мая 2004 г. [Гордеев, Шевченко, 2012].

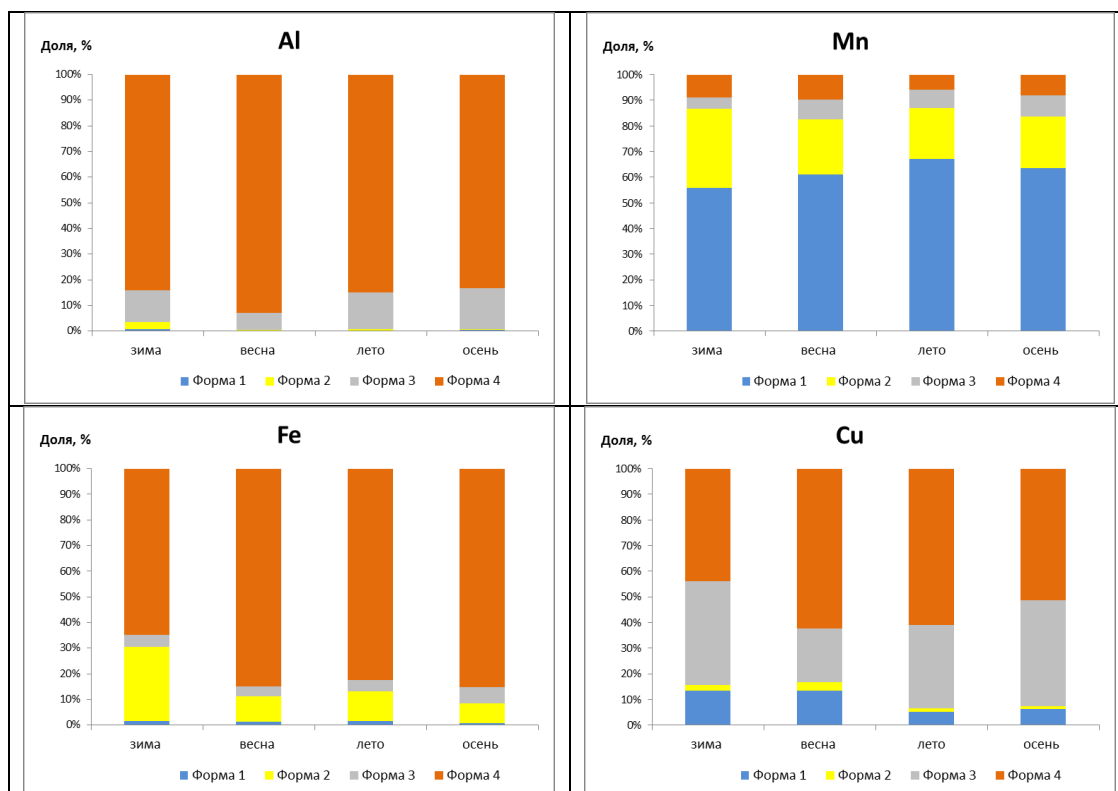


Рис. 1. Соотношение форм химических элементов в пробах осадочной взвеси реки Северной Двины.

Таблица 1. Химический состав осажденной проб взвеси Северной Двины, в которых определялись формы нахождения химических элементов

Элемент, %	Время отбора взвеси									
	12. 2016	01. 2016	02. 2016	03. 2016	04. 2016	05. 2016	05. 2017	05. 2018	06. 2016	06. 2017
Al	4,78	3,64	4,76	2,69	2,61	4,36	3,06	5,16	5,42	5,31
Fe	5,26	6,00	5,50	3,60	3,13	3,80	4,51	4,68	4,65	5,00
Mn	0,64	0,38	0,28	0,30	0,24	0,16	0,34	0,28	0,45	0,31
Cu	0,031	0,042	0,028	0,029	0,037	0,024	0,022	0,025	0,038	0,029
	07. 2016	07. 2017	08. 2016	08. 2017	08. 2018	09. 2015	09. 2016	10. 2016	11. 2016	11. 2017
Al	4,58	2,17	4,52	1,96	3,84	1,60	4,20	4,81	4,18	1,69
Fe	3,93	4,08	4,58	5,45	4,14	2,46	4,12	4,56	4,45	3,98
Mn	0,96	0,58	0,71	0,28	0,74	0,65	0,41	0,49	0,38	0,41
Cu	0,027	0,010	0,027	0,017	0,023	0,110	0,024	0,023	0,040	0,008

Основной формой алюминия в течение всего года является форма Ф4 – силикатно-обломочная. Она составляет в среднем 85% от валового содержания металла за год, чуть возрастая до 96% в период весеннего половодья. Аналогичные данные получены в работе (Ш, Г) , где доля Ф4 составляет 88,4%. Форма Ф1 и Ф2 – сорбированный комплекс и аморфные гидроксилы железа и марганца, имеют подчиненное значение, менее 1 %. На Ф3, связанную с органическим веществом, приходится от 6,77% весной, до 12,4–16,1% в другие сезоны, что можно объяснить высоким содержанием $C_{орг}$ – в среднем около 12 %.

В соотношении форм нахождения железа, также как и для алюминия превалирует Ф4 – 64,8% зимой и 84,8% в другие сезоны. Значительными становятся формы Ф2 и Ф3. Форма Ф2 имеет максимальные значения в зимнюю межень (28,7%), когда гидродинамическая обстановка способствует развитию биогеохимических процессов в водной толще, и около 9,7 % в другое время года. Форма Ф3 (3,78% – 6,29%) незначительно меняется между сезонами.

Распределение валового содержания марганца по формам значительно отличается от соотношений для железа и алюминия: доля формы Ф4 всего 8,1%. Адсорбированный комплекс формы Ф1 оказывается самым важным – 61,9%, что близко к данным [Гордеев, Шевченко, 2012]– 53,5%). Повысилась доля формы Ф2, на неё приходится от 20 до 30%. Форма Ф3 мало изменяется в течение года, составляя в среднем 6,7%.

В распределении меди основной остается доля формы Ф4 (54,3%), но высока доля формы Ф3, связанная с органическим веществом, – от 20% весной, до 40% в осенне-зимний период. На форму Ф1 и Ф2 приходится 9,5% и 2% соответственно.

Геохимическая подвижность всех элементов оказывается ниже в период весеннего половодья, когда сток Северной Двины максимален и биогеохимические процессы не успевают развиваться. В остальные периоды повышение подвижности для каждого элемента обеспечивают разные формы: форма Ф3 для алюминия и меди, форма Ф2 для железа и форма Ф1 для марганца. Высокий уровень взвешенного органического вещества, вклад фитопланктона приводит к усилению геохимической подвижности металлов во взвеси Северной Двины.

Заключение

Полученные данные показывают, что закономерности соотношения форм элементов во взвеси Северной Двины определяется как физико-химическими свойствами элементов, так и физико-географическими условиями среды.

Финансирование

Работа поддержана государственным заданием в рамках НИР FMWE-2021-0006

Список литературы:

1. Гордеев В.В., Шевченко В.П. Формы нахождения некоторых металлов во взвеси Северной Двины и их сезонные вариации // *Океанология*. 2012. Т. 52. № 2. С. 282–291.
2. Гордеев В.В., Дара О.М., Алексеева Т.Н., Коченкова А.И., Боев А.Г., Лохов А.С., Белоруков С.К. Сезонные вариации гранулометрического и минерального состава взвеси в маргинальном фильтре Северной Двины (Белое море) // *Океанология*. 2020. Т. 60. № 3. С. 442–451.
3. Гордеев В.В., Коченкова А.И., Лохов А.С., Яковлев А.Е., Белоруков С.К., Федулов В.Ю. Сезонные и межгодовые вариации концентраций и стоков растворенных и взвешенных форм органического углерода, железа и марганца Северной Двины в Белое море // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 1. С. 41–55
4. Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В., Коробов В.Б., Белоруков С.К., Лохов А.С., Яковлев А.Е. Особенности сезонного распределения взвеси и органического углерода по данным обсерватории "Маргинальный фильтр реки Северная Двина" // *Океанологические исследования*. 2018. Т. 46. № 2. С. 96–111.
5. Демина Л.Л., Гордеев В.В., Фомина Л.С. Формы Fe, Mn, Zn и Cu в речной воде и их изменения в зоне смешения речных вод с морскими (на примере рек бассейнов Черного, Каспийского и Азовского морей) // *Геохимия*. 1978. № 8. С. 1211–1229.
6. Демина Л.Л., Будько Д.Ф., Алексеева Т.Н., Новигатский А.Н., Коченкова А.И. Формы нахождения алюминия, железа, марганца и микроэлементов в поверхностных донных осадках Белого моря // В книге: Система Белого моря. Российская академия наук, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Москва, 2017. С. 460–503.
7. Chester R., Hughes M.J. A chemical technique for separation of ferromanganese minerals and adsorbed trace metals from pelagic sediments // *Chem. Geol.* 1967. V. 2. № 3. P. 249–257.
8. Lisitsyn A.P. The marginal filter of the ocean // *Oceanology*. – 1995. – Vol. 34. No. 5. – P. 671–681.

УДК 551.435.3

Рубрика 38.47.00

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ДИНАМИКИ БЕРЕГОВ
ЗАПАДНОГО ЯМАЛА**

**SPATIOTEMPORAL VARIABILITY OF THE COASTAL DYNAMICS OF THE WESTERN
YAMAL**

**Кажукало Георгий Анатольевич¹, Новикова Анна Владиславовна¹, Мысленков
Станислав Александрович¹, Шабанова Наталья Николаевна¹, Белова Наталия
Геннадиевна¹, Огородов Станислав Анатольевич¹**

¹ *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова (МГУ), г. Москва*

**Kazhukalo Georgii Anatolevich¹, Novikova Anna Vladislavovna¹, Myslenkov Stanislav
Aleksandrovich¹, Shabanova Natalya Nikolaevna¹, Belova Nataliya Gennadievna¹,
Ogorodov Stanislav Anatolevich¹**

¹ *Lomonosov Moscow State University (MSU), Moscow*

Введение

Большинство исследований береговой зоны Арктических морей выявило интенсификацию разрушения берегов в последние десятилетия [Lantuit et al., 2012; Ogorodov et al., 2020]. Несмотря на низкий динамический возраст, обусловленный ледовитостью акваторий, средняя скорость размыва берегов в пределах Арктики выше, чем в умеренных широтах, и оценивается в $-0,5$ м/год [Lantuit et al., 2012]. Наблюдаемое увеличение температур воздуха и продолжительности безледного периода позволяет прогнозировать дальнейшую интенсификацию размыва берегов Арктических морей [Nielsen et al., 2022]. При этом даже при относительно однородном гидродинамическом воздействии скорости разрушения отдельных береговых сегментов в пределах одной литодинамической системы могуткратно отличаться и достигать нескольких метров в год. Пространственная неоднородность темпов отступления может быть обусловлена локальными геоморфологическими и криолитологическими особенностями или техногенным воздействием. В условиях изменения климата и растущего хозяйственного освоения Арктики, оценка факторов пространственно-временной изменчивости динамики берегов является не только фундаментальной, но и важнейшей прикладной задачей.

С целью уточнения закономерностей развития как термоабразионных, так и аккумулятивных берегов Западного Ямала, в пределах Харасавэйского района был проведен анализ разновременных данных ДЗЗ. Предшествующие исследования [Белова и др., 2017; Belova et al., 2020] были посвящены динамике южного сегмента, представленного термоабразионными уступами размыва. Динамика аккумулятивных берегов к северу от пос. Харасавэй, в свою очередь, оставалась малоизученной.

Материалы и методы

С помощью космических снимков очень высокого и сверхвысокого разрешения, а также архивных аэрофотоснимков, для 20-километрового участка от мыса Бурунный до мыса Харасавэй были оцифрованы береговые линии по 10 временным срезам за период с 1964 по

2022 гг. Для термоабразионных берегов за береговую линию условно принималось положение бровки уступа, для аккумулятивных – штормового вала, который уверенно дешифрируется по светотону. В среде ArcGIS с помощью расширения DSAS v.5.1 [Himmelstoss et al., 2021] были получены скорости изменения береговой линии с шагом 100 м. Для оценки факторов пространственной изменчивости скоростей отступления были использованы морфометрические данные – высота уступа и крутизна пляжа выделены с помощью ЦМР ArcticDEM с пространственным разрешением 2 м [Porter et al., 2018], а ширина пляжа получена путём автоматического дешифрирования космического снимка сверхвысокого разрешения (WV-2, 0.5 м). Кроме того, были использованы полевые данные [Белова и др., 2017] о геокриологическом строении береговых уступов. Для оценки временной изменчивости гидрометеорологического потенциала были проведены расчеты термического и волнового воздействия с помощью метода Попова-Совершаева [Попов, Совершаев, 1982] и модели WaveWatch III [Tolman, 2019] на основе ERA5 Reanalysis [Hersbach et al., 2020].

Результаты и обсуждение

Как для термоабразионных, так и аккумулятивных берегов исследуемой территории характерна многолетняя тенденция к размыву – среднемноголетние скорости отступления береговой линии составили -1.03 м/год и -0.42 м/год, соответственно. Скорости размыва термоабразионных берегов, несмотря на устойчивый эрозионный тренд, характеризуются высокой пространственно-временной неоднородностью (рис. 1). Наибольшие скорости отступления (до -7.9 м/год в период с 1982 по 1988 гг.) наблюдаются в 4 км к югу от устья р. Нявоталаваяха и в створе мыса Харасавэй. К северу от устья Нявоталаваяхи среднемноголетние темпы разрушения существенно ниже и, как правило, не превышают -0.8 м/год. Скорость размыва антропогенно-трансформированного берега в створе посёлка Харасавэй составляет -0.9 м/год с пиковыми значениями до -1.4 м/год (в период с 1977 по 1982 гг.). В среднем для термоабразионного сегмента характерно постепенное снижение скоростей отступления береговой линии, что не согласуется с полученным трендом гидрометеорологического потенциала.

Для аккумулятивных песчаных пляжей от пос. Харасавэй до мыса Бурунный характерен практически повсеместный и устойчивый (в масштабе десятилетий) размыв - только на 6% береговой линии наблюдается аккумуляция. Выдвижение береговой линии (до 5.12 м/год за весь исследуемый период) происходит в створе мыса Бурунный и к северо-востоку от него. Южная оконечность мыса, напротив, характеризуется наибольшими скоростями размыва (до -2.03 м/год за 1964 – 2022 гг.), что свидетельствует о вдольбереговом перемещении наносов и смещении мыса в северо-восточном направлении. Пиковые значения размыва на аккумулятивном сегменте также наблюдаются в 1 км к югу от м. Бурунный и достигают -8.99 м/год.

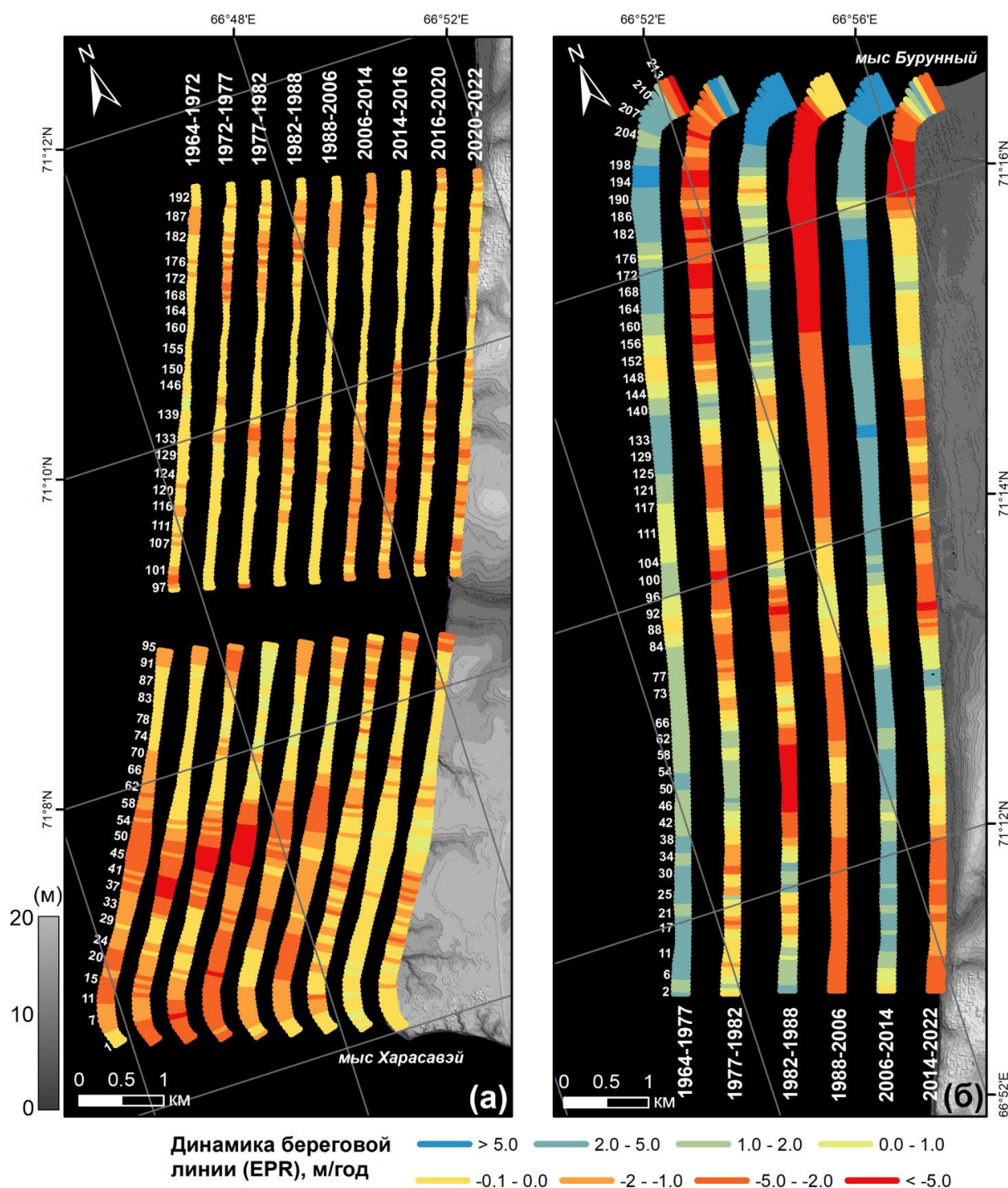


Рис. 1. Динамика термоабразионного (а) и аккумулятивного (б) сегментов береговой зоны в пределах Харасавэйского района

Сопоставление литолого-криолитологического строения уступов размыва и темпов отступления подтвердило выявленную ранее [Белова и др., 2017] приуроченность пиковых скоростей термоабразии к участкам, сложенным сильнольдистыми морскими суглинками (среднеголетняя скорость размыва достигает -2.75 м/год). Тем не менее, средние значения разрушения при различном криолитологическом строении уступа различаются слабо – от -1.0 м/год в сильнольдистых морских суглинках до -0.9 м/год в морских и озёрно-аллювиальных песках. Анализ морфометрических показателей надводной части берега не выявил статистически значимой корреляции с динамикой термоабразионного и аккумулятивного сегментов, что может быть обусловлено низкой разрешающей способностью данных дистанционного зондирования. Однако наиболее вероятно, что отсутствие явной зависимости

между климатическим трендом, геолого-геоморфологическими особенностями и динамикой берегов обусловлено неравномерным по пространству и во времени техногенным воздействием. Пиковые значения отступления бровки берегового уступа приурочены к началу пионерного освоения месторождения (с конца 70-х гг.), в ходе которого в створе мыса Харасавэй и в устьях крупных оврагов проводилось изъятие пляжеобразующих наносов и отложений уступа размыва, дноуглубительные работы в протоке [Belova et al., 2020, Ogorodov et al., 2023]. На аккумулятивном сегменте максимальные скорости отступления (к югу от м. Бурунный) могут быть также обусловлены гидронамывной добычей песка на пляже и низкой лайде. Наличие участков, динамика которых обусловлена прямым техногенным воздействием на рельеф береговой зоны, не позволяют выявить четкой зависимости между изменениями климата и временной изменчивостью в динамике берегов, наблюдаемой на малоосвоенных ключевых участках Карского моря [Baranskaya et al., 2020; 2021]. Это подтверждается и проведенной кластерной сегментацией, в результате которой для 71% термоабразионного берега характерно медленное увеличение среднемноголетних скоростей размыва, что отражает климатически предопределенный тренд на интенсификацию термоабразионного и термоденудационного процессов.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы лаборатории геоэкологии Севера географического ф-та МГУ им. М.В. Ломоносова 121051100167-1.

Список литературы:

1. Lantuit H., Overduin P.P., Couture N., Wetterich S. et al. The Arctic Coastal Dynamics database. A new classification scheme and statistics on arctic permafrost coastlines // *Estuaries and Coasts*. 2012. V. 35. P. 383–400.
2. Ogorodov S., Aleksyutina D., Baranskaya A., Shabanova N., Shilova O. Coastal erosion of the russian arctic: An overview // *Journal of Coastal Research*. 2020. No. 95. P. 599–604.
3. Nielsen D.M., Pieper P., Barkhordarian A., Overduin P. et al. Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century // *Nature Climate Change*. 2022. No. 12. P. 263–270. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01281-0>
4. Белова Н.Г., Шабанова Н.Н., Огородов С.А., Камалов А.М., Кузнецов Д.Е., Баранская А.В., Новикова А.В. Динамика термоабразионных берегов Карского моря в районе мыса Харасавэй (Западный Ямал) // *Криосфера Земли*. 2017. Т. 21. № 6. С. 85–96
5. Belova N.G., Novikova A.V., Günther F., Shabanova N.N. Spatiotemporal variability of coastal retreat rates at Western Yamal Peninsula, Russia, based on remotely sensed data // *Journal of Coastal Research*. 2020. Special Issue No. 95. P. 367–371.
6. Himmelstoss E.A., Henderson R.E., Kratzmann M.G., Farris A.S. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) ver. 5.1 User Guide: USGS Open-File Report 2021–1091; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA, 2021. 104p
7. Porter C., Morin P., Howat I., Noh M. et al. ArcticDEM; Harvard Dataverse: Cambridge, MA, USA, 2018.
8. Попов Б.А., Совершаев В.А. Некоторые черты динамики арктических берегов Азии // *Вопросы географии*. 1982. Вып. 119. С. 105–116.
9. Tolman H. The WAVEWATCH III Development Group User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III Version 6.07. Tech. Note 333, NOAA/NWS/NCEP/MMAB 2019.

10. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A. et al. The ERA5 global reanalysis // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. No. 146. 1999–2049.
11. Ogorodov S.,/ Badina S., Bogatova D. Sea Coast of the Western Part of the Russian Arctic under Climate Change: Dynamics, Technogenic Influence and Potential Economic Damage // Climate 2023. No. 11. 143. <https://doi.org/10.3390/cli11070143>
12. Baranskaya A., Novikova A., Shabanova N., Romanenko F., Ogorodov S. Late quaternary and modern evolution of permafrost coasts at Beliy island, Kara Sea // Journal of Coastal Research 2020. No. 95. P. 356–361.
13. Baranskaya A., Novikova A., Shabanova N., Belova N., Maznev S., Ogorodov S., Jones B.M. The role of thermal denudation in erosion of ice-rich permafrost coasts in an enclosed bay // Frontiers in Earth Science. 2021. No. 8. 566227. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.566227>.

УДК 551.89

Рубрика 38.21.31

КОРРЕЛЯЦИЯ СЕЙСМОСТРАТИГРАФИЧЕСКИХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

CORRELATION OF SEISMOSTRATIGRAPHIC UNITS OF THE SOUTHERN PART OF THE EAST SIBERIAN SEA

Чекулаев Александр Владимирович¹, Рябчук Дарья Владимировна¹, Буданов Леонид Михайлович¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт имени А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ), Санкт-Петербург

Chekulaev Alexander Vladimirovich¹, Ryabchuk Daria Vladimirovna¹, Budanov Leonid Mikhailovich¹

¹ A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI), Saint-Petersburg

Введение

Последнее время с нарастающей интенсивностью происходит активное освоение Арктической зоны России, связанное с геологоразведкой и освоением минерально-сырьевых ресурсов шельфа и береговой зоны морей [Дмитриевский А.Н., 2019], расширением потребностей в коммуникационных сетях и возрастающей нагрузкой на Северный морской путь - транспортному коридору мирового значения. В связи с вышеизложенным, для адекватного пространственного планирования хозяйственной деятельности и эффективного освоения акватории и прибрежных районов суши все большую актуальность обретают исследования, направленные на изучения шельфов Арктических морей. Восточно-Сибирское море представляет собой район с невысокой степенью геологической и геофизической изученности из-за тяжелых ледовых и климатических условий и относительно малых глубин, особенно в прибрежной части.

В рамках проектов по государственному геологическому картированию миллионного масштаба (ГК-1000/3) на акватории Восточно-Сибирского моря специалистами Всероссийского научно-исследовательского геологического института имени А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ) были проведены две экспедиции - в 2018 году на листах R57-60 и в 2020 году на листах S55-S56. Экспедиции включали комплексные геолого-геофизические исследования: сейсморазведка высокого(СВР) и сверхвысокого разрешения(ССВР), непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), гидролокация бокового обзора (ГЛБО), отбор донных проб и подводное фото-телепрофилирование. Эти экспедиции существенно повысили уровень геолого-геофизической изученности акватории и позволили впервые получить сейсмоакустические срезы для большинства листов номенклатуры миллионного масштаба (рис. 1).

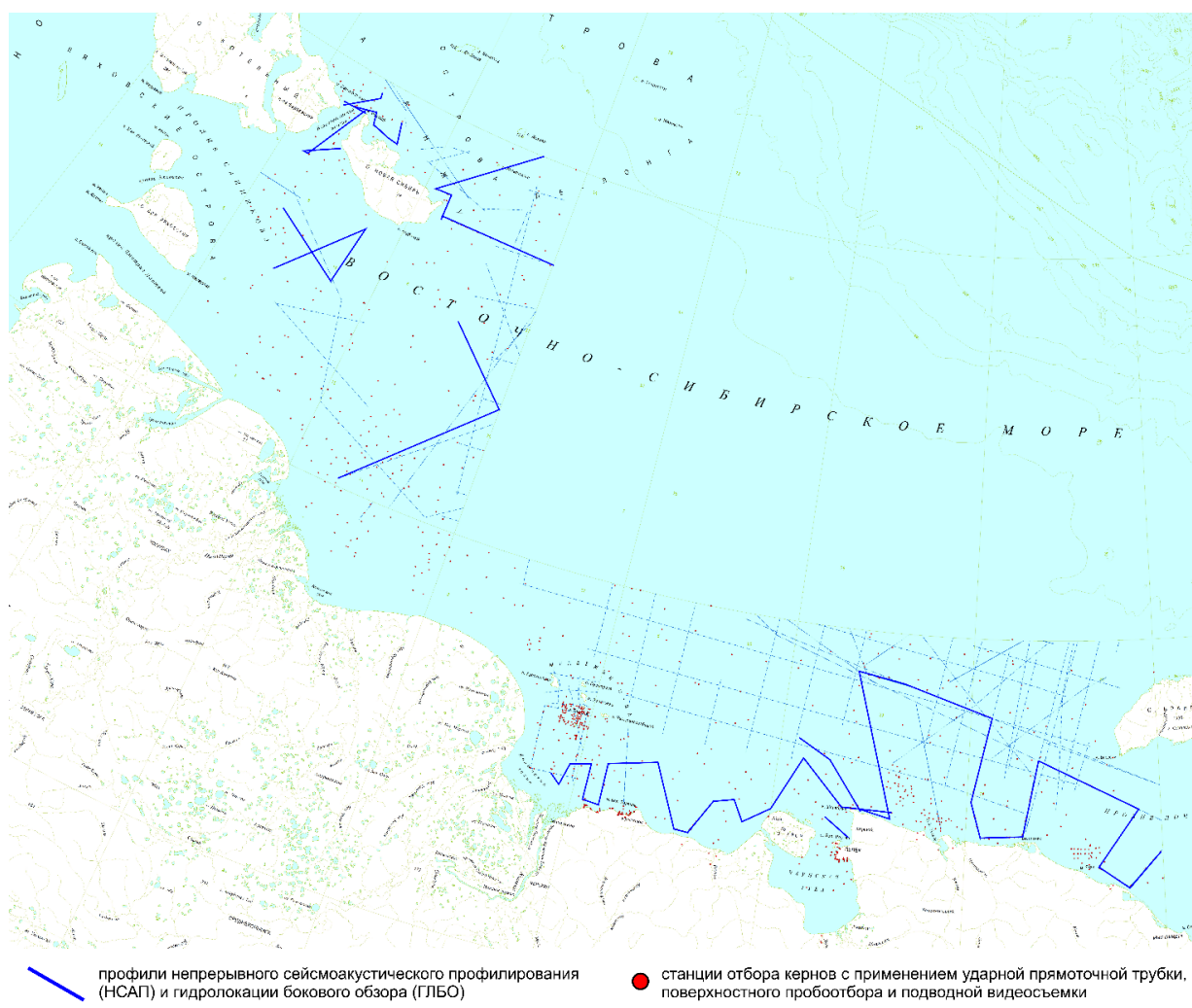
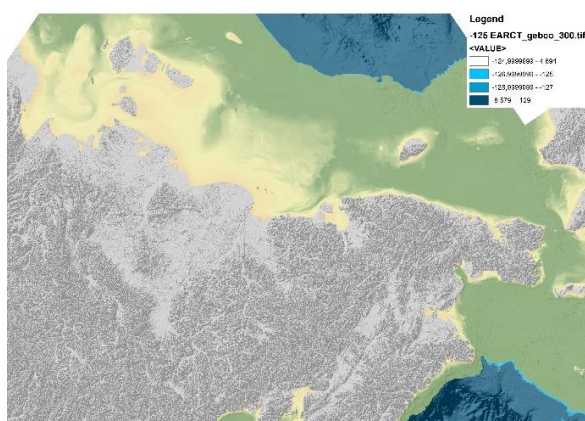


Рис.1. Схема фактического материала геолого-геофизических работ 2018 г. на акваториальной части листов R-57–60 и геолого-геофизических работ 2020 г. в акваториальной части листов S-55, 56.

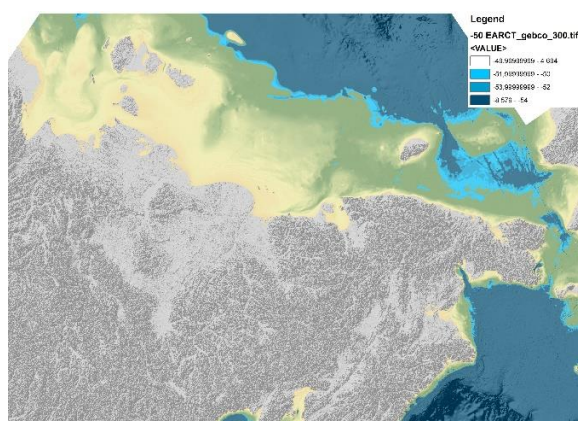
Результаты

На полученных в ходе рейсов сейсмических разрезах были выделены сейсмотолщи [Чекулаев и др., 2023], выполнена их корреляция со стратиграфо-генетическими подразделениями суши, составлены полистные карты четвертичных образований на акваторию Восточно-Сибирского моря. Огромная площадь исследований, все еще редкая, несмотря на последние исследования, сеть профилирования и опробования, отсутствие глубокого бурения на шельфе, а также, дефицит данных датирования не позволили не составить единую сейсмостратиграфическую схему для всей исследуемой площади в рамках ГК-1000/3. Корреляция геолого-геофизических данных, полученных для восточной и крайне западной частей Восточно-Сибирского моря, представляет собой достаточно сложную задачу. Кроме того, сложность корреляции обусловлена асинхронностью палеогеографических событий, связанной с различиями в рельефе, тектоническом режиме [Имаева и др., 2018] и факторах осадконакопления восточной и западной частей моря. Асинхронность развития послесартанской трансгрессии иллюстрируют предварительные палеогеографические схемы, составленные на основе моделей рельефа дна и существующих представлений об изменении уровня моря [Vauch et al., 2001; Клювиткина, Полякова, 2019] (рис. 2). Трансгрессия развивалась крайне неравномерно, начиная с Чукотского моря, где около 11 тыс.л.н. сформировался закрытый залив (лагуна), в

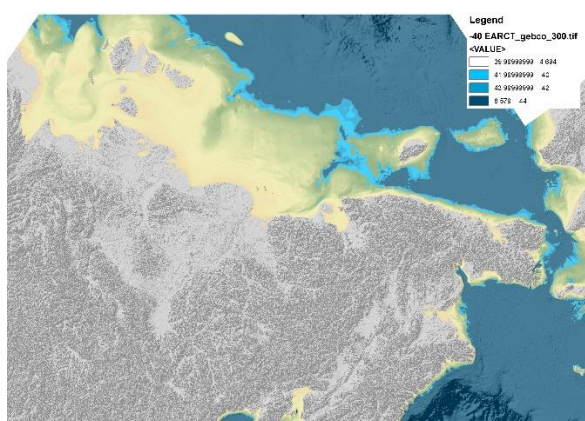
то время как остальная часть исследуемой площади оставалась сушей. Около 10 тыс. л.н. первые связанные с открытым морем лагуны образовались к западу от о-ва Врангеля, к 8,5 тыс.л.н. современные прибрежные участки Чукотского и восточной части Восточно-Сибирского моря уже были затоплены морской трансгрессией, в то время как на западе Восточно-Сибирского моря массив суши все еще простирался до современного о-ва Новая Сибирь включительно. К сожалению, сейсмоакустических данных, которые позволили бы построить аналогичную модель для нижнего и среднего неоплейстоцена с учетом мощностей отложений этого возраста, хотя бы с некоторой долей достоверности, очевидно, не достаточно.



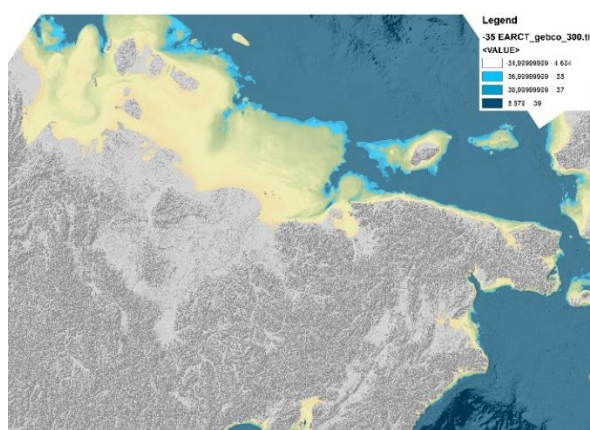
-125 м, 24 тыс.л.н.



- 50 м, около 11 тыс. кал. л.н.



- 40 м, около 10 тыс. кал. л.н.



- 35 м, около 9 тыс.л.н.



- 27 м, 8,5 тыс. л.

- 10 м, около 6.5 тыс. л.н.

Рис. 2. Палеогеографические реконструкции развития южной части Восточно-Сибирского моря и Чукотского моря в верхнем неоплейстоцене-голоцене.

Для интерпретации материалов сейсмоакустического профилирования восточного участка исследований наряду с результатами изучения колонок, собранных в ходе рейсов, были использованы все доступные опубликованные и фондовые материалы по акватории и прилегающей суше, в том числе результаты колонкового пробобора вдоль профиля 5-AP (к западу от о-ва Врангеля) [Сакулина и др., 2011], бурения со льда, осуществлявшегося в ходе опытно-методических геолого-геофизических работ в Колымском заливе, результаты интерпретации которых содержатся в неопубликованных отчетах В.А. Калиничева (1987, 1988) и детальных исследований единственной глубокой скважиной в пределах изучаемой площади, пробуренной и в 1978–1979 гг. Чаунской комплексной геологоразведочной экспедицией (КГРЭ) в западной части о-ва Айон [Слободин и др., 1990].

Изученность суши (как береговых обнажений материковой суши, так и скважин, и обнажений на островах) западной части Восточно-Сибирского моря предоставляет значительно больше возможностей для интерпретации материалов исследования акватории [Прохорова, 1973; Гравис, 1978; Конищев, Колесников, 1981; Труфанов и др., 1986; Nagaoka, 1995; Анисимов и др., 2002; 2006; 2015; Базилян, 2006; 2007 а,б; 2008; 2009 а,б; 2010 а, б; Никольский и др., 2017; Павлова и др., 2010; Тумской, 2012 и др., Буданов и др., 2022]. В то же время, для этого района до настоящего времени не выработан консенсус даже по такому принципиальному вопросу палеогеографического развития как наличие либо отсутствие материкового оледенения в среднем неоплейстоцене.

При создании единой сейсмостратиграфической схемы южной части Восточно-Сибирского моря мы опирались также на результаты исследований прилегающих территорий Чукотского моря [Гусев и др., 2014; 2016; Gusev et al., 2009 и др.] и многочисленные публикации по внешнему шельфу Восточно-Сибирского моря и морю Лаптевых [Bauch et al., 2000; Система..., 2009; Klemann et al., 2015; Клювиткина, Полякова, 2019 и др.].

Выводы

По результатам переинтерпретации сейсмоакустических и геологических данных была составлена предварительная сейсмостратиграфическая схема четвертичных отложений прибрежно-шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря (от Новосибирских островов до о-ва Врангеля) [Чекулаев и др., 2023]. Схема будет уточняться в ходе продолжения реализации проекта по результатам анализа запланированного комплекса лабораторных исследований кернов.

Отложения среднего-верхнего голоцена соответствует ССТ-I, выделяемый в районе от устья р.Колыма до о-ва Врангеля, и верхняя часть ССТ-1, выделяемая в районе Новосибирских островов. Отложения сейсмотолщ представлены глинистыми алевритами, алевропелитами, миктитами и т.д. Сейсмотолщи имеют «игольчатый» характер кровли, обусловленный ледовой экзарацией.

Отложениям верхнего неоплейстоцена (послесартанское потепление (18-11 тыс.лет.назад) - раннего голоцена на западе акватории Восточно-Сибирского моря соответствует ССТ-II, а на востоке нижняя часть ССТ-1. Сейсмотолща ССТ-II имеет изменчивую мощность и выделяется по ослаблению внутренних отражений по сравнению с ССТ-I, однако в акустическом облике ССТ-1 не выделяется.

Отложениям каргинской трансгрессии и следам сарганской регрессии (верхнего неоплейстоцена) соответствует на западе ССТ- IIIa, а на востоке ССТ-2. Кровли этих сейсмоторщ часто осложнены палеоврезами. а акустический облик с субгоризонтальными протяженными осями синфазностями характерен для морских отложений.

Отложениям казанцевской трансгрессии и зырянской регрессии (озерное осадконакопление либо перерыв в осадконакоплении) соответствует на западе ССТ- IIIб, а на востоке ССТ-3. Сейсмоторщи характеризуются интенсивными отражениями от кровли и наличием субгоризонтальной слоистости. Для ССТ- IIIб характерны проявления мерзлых и газонасыщенных отложений, а для ССТ3 многочисленные неглубокие врезы в подошве.

Нерасчлененные озерные, аллювиальные и морские отложения нижнего (?) - среднего неоплейстоцена соответствуют ССТ-IV на востоке и ССТ-4 на западе. Сейсмоторщи имеют изменчивый по латерали облик, что отражается в различиях в проявлении слоистости – от четко выраженной с разными углами наклона до практически полного ее отсутствия и свидетельствует о полигенетическом происхождении отложений слагающих ее.

В западной части гелазий - нижний неоплейстоцен, в восточной части – плиоцен- нижний неоплейстоцен представлены ССТ5 и ССТV соответственно. Акустический облик сейсмоторщ схож и определяется наличием крупных хорошо выраженных клиноформ, отложения этих ССТ заполняют понижения в кровле нижележащего комплекса.

Благодарность

Авторы благодарят В.А. Жамойду и А.Ю. Сергеева за всестороннюю помощь разработку палеогеографической реконструкции.

Финансирование

Полевые работы осуществлены в 2018–2020 гг. в рамках Государственного задания ФГБУ “ВСЕГЕИ” (ГК-1000/3 листов R-56-60, S-55,56). Аналитические исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-27-00412 «Реконструкция палеогеографического развития прибрежных районов шельфа Восточно-Сибирского моря в неоплейстоцене – голоцене».

Список литературы:

1. Анисимов М. А., Москаленко И. Г. Условия формирования рецентных и субрецентных спорово-пыльцевых спектров на острова Бенетта (Новосибирские острова) // Вестник СПбГУ. Серия 7, Геология, география. 2006. № 1. С. 120 – 130.
2. Анисимов М.А., Пушина З.В., Питулько В.В. Вклад неотектоники в процессы формирования современного облика береговой линии Новосибирских островов // Материалы IX Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода (г. Иркутск, 15-20 сентября 2015 г.). Иркутск. Изд-во института географии СО РАН. 2015. С. 19-21.
3. Анисимов М.А., Гумской В.Е., Иванова В.В. Пластовые льды Новосибирских островов как реликт древнего оледенения // Материалы гляциологических исследований. Вып. 101, Москва, 2006. С. 143–145.

4. Анисимов М.А., Тумской В.Е., Саватюгин Л.М. К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Известия Русского Географического общества. 2002. Том 134. Вып. 5. С. 32-37.
5. Базилян А.Э. и др. Возраст следов покровного оледенения Новосибирских о-вов по данным $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - датирования раковин моллюсков // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. – Москва: Санкт-Петербург, 2010. - [Т.4]: Строение и история развития литосферы. - С. 506-514.
6. Базилян А.Э., Анисимов М.А., Никольский П.А. Оледенение Новосибирских островов: определяющий фактор геол. строения квартера // Геология полярных областей Земли. - Москва, 2009. - Т.1. - С.43-45.
7. Базилян А.Э., Анисимов М.А., Павлова П.А., Питулько В.В., Никольский Е.Ю. Опорный разрез квартера Яно-Индибирской низменности в нижнем течении реки Яна // Материалы VI Всероссийской конференции по изучению четвертичного периода «Фундаментальные проблемы квартера: итоги изучения и основные направления дальнейших исследований», 19-23 октября, Новосибирск, 2009. С. 63-65.
8. Базилян А.Э., Никольский П.А. О плейстоценовом оледенении Новосибирских островов // Геологические события неогена и квартера России: современ. состояние стратигр. схем и палеогеогр. реконструкции. - Москва, 2007. - С.10-12.
9. Базилян А.Э., Никольский П.А. Опорный разрез четвертичных отложений мыса Каменный (о-в Новая Сибирь) // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода, 2007, № 67, С. 76–84.
10. Базилян А.Э., Никольский П.А., Анисимов М.А. Плейстоценовое оледенение Новосибирских островов – сомнений больше нет // Новости МПГ 2007/08. 2008. №12.
11. Базилян А.Э., Никольский П.А., Тумской В.Е., Анисимов М.А. Стратиграфия четвертичных отложений Новосибирских островов и севера Яно-Индибирской низменности. Проблема корреляции плейстоценовых событий на Русском Севере // Тезисы докладов международного рабочего совещания. 4-6 декабря 2006 г. Санкт-Петербург, 2006, С. 17.
12. Базилян, 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. Паулсен, 2010. №640. С. 506-514.
13. Буданов Л.М., Сергеев А.Ю., Жамойда В.А., Рябчук Д.В., Неевин И.А., Носевич Е.С., Пушина З.В., Григорьев А.Г., Баширова Л.Д., Пономаренко Е.В., Прищепенко Д.В. Новые данные по сейсмостратиграфии и палеогеографическому развитию Восточно-Сибирского моря (листы R-57–60) Региональная геология и металлогения, Номер 92, с. 5-27 (год публикации - 2022).
14. Гравис Г.Ф. Аллювиально-пролювиальная модель формирования многолетнемерзлых толщ на флювиальных равнинах криолитозоны // Мат. Первой конф. геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва. Книга 1. 1996. С. 186-192.
15. Гусев Е.А., Аникина Н. Ю., Деревянко Л.Г. и др. Развитие природной среды южной части Чукотского моря в голоцене // Океанология, 2014. Т. 54. № 4. С. 505–517.
16. Гусев Е.А., Молодьков А.Н., Стрелецкая И.Д. и др. Отложения казанцевской трансгрессии (МИС 5) Енисейского севера // Геология и геофизика. 2016. № 4. С. 743–757.

17. Дмитриевский А. Н., Еремин Н. А., Шабалин Н. А. Нефтегазоносные комплексы осадочного чехла Арктической зоны Сибирской платформы (краевых зон севера Сибирской платформы?) // SPE Russian Petroleum Technology Conference. — Society of Petroleum Engineers, 2019.
18. Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И. Напряженно-деформированное состояние новейших структур северо-восточного сектора Российской Арктики // Доклады Академии наук. 2018. Том 479. № 2. С. 192–194.
19. Клювиткина Т.С., Полякова Е.И. Изменения палеогидрологических условий в море Лаптевых в позднем плейстоцене и голоцене по материалам исследования водных палиноморф // Океанология. 2019. № 59(3). С. 433–448.
20. Конищев В.Н., Колесников С.Ф. Особенности строения и состава позднекайнозойских отложений в обнажении Ойогосский яр // Проблемы криолитологии. 1981. Вып. IX. С. 107–117.
21. Никольский П. А., Басилян А. Э., Зажигин В. С. Новые данные о возрасте оледенения Новосибирских островов (Восточная Арктика) // Доклады Академии Наук, 2017, Т. 475, № 2, с. 176–179.
22. Павлова Е.Ю., Анисимов М.А., Дорожкина М.В., Питулько В.В. Следы древнего оледенения на о. Новая Сибирь (Новосибирские острова) и природные условия района в позднем неоплейстоцене // Лёд и Снег, 2010, № 2 (110), с. 85-92.
23. Прохорова С.М., Иванов О.А. Оловоносные гранитоиды Яно-Индибирской низменности и связанные с ними россыпи. Л.: Недра. 1973. 229 с.
24. Сакулина Т.С., Верба М.Л., Кашубина Т.В., Крупнова Н.А., Табырца С.Н., Иванов Г.И. Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-АР в Восточно-Сибирском море // Разведка и охрана недр. 2011. № 10. С. 17-23.
25. Слободин В.Я., Ким Б.И., Степанова Г.В., Коноваленко Ф.Я. Расчленение разреза Айонской скважины по новым биостратиграфическим данным // Стратиграфия и палеонтология мезо-кайнозоя Советской Арктики. Л.: Изд-во ПГО «Севморгеология», 1990. С. 43–58.
26. Труфанов Г.Ф. и др. Государственная геологическая карта СССР м-ба 1:200 000. Новосибирские о-ва. Листы: Т-54-XXXIV, XXXV, XXXVI; S-54-IV, V, VI, X, XI, XII; S-55-I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII; S-56-III, VI. ОЗ, Москва, 1986, 55 с.
27. Тумской В. Е. Особенности криолитогеоза отложений северной Якутии в среднем неоплейстоцене-голоцене // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, №1, с. 12-21.
28. Чекулаев А.В., Рябчук Д.В., Буданов Л.М., Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Невин И.А. Корреляция сейсмостратиграфических подразделений южной части Восточно-Сибирского моря. // сборник докладов 19-ой научно-практической конференции «Инженерная и рудная геофизика 2023 - Морские технологии», 2023.
29. Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global and Planetary Change. 2001, №31. P.125–139.
30. Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y. et al. Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling // Global & Planetary Change. 2009. №68(1–2). №115–131.
31. Klemann V., Heim B., Bauch H.A. et al. Sea-level evolution of the Laptev Sea and the East Siberian Sea since the last glacial maximum // Arktos. 2015 №.1. P.1–8.

32. Nagaoka, D., Saljo, K., Fukuda M. Sedimental environment of the Yedoma in high Arctic eastern Siberia // Proc. of the Third Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994. Tsukuba, Hokkaido. Japan. 1995. P. 8-13.

УДК 550.361+553.98+548.562(268.56)

Рубрика 38.19.31

ГЕОТЕРМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ЕВРАЗИЙСКОЙ ОКРАИНЫ СЕВЕРНОГО
ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ДЛЯ РАСЧЕТА УСЛОВИЙ СТАБИЛЬНОСТИ ГАЗОВЫХ
ГИДРАТОВ

GEOTHERMAL ZONING OF THE EURASIAN MARGIN OF THE ARCTIC OCEAN TO
ESTIMATE CONDITIONS OF GAS HYDRATE STABILITY

**Бочкарев Алексей Викторович¹, Смирнов Юрий Юрьевич^{1,2}, Матвеева Татьяна
Валерьевна¹**

¹ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург

²РГГМУ, Санкт-Петербург

Bockarev Alexei Victorovich¹, Smirnov Yuri Yurievich^{1,2}, Matveeva Tatiana Valerievna¹

¹VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg

²RSHU, Saint-Petersburg

Введение

В рамках работ по количественной оценке ресурсов газовых гидратов в ИЭЗ Российской Федерации, проводимых во ВНИИОкеангеология в последние годы, на площадке MARESEDU в 2020-2023 годах был представлен ряд докладов по моделированию и расчету зоны стабильности, как фильтрогенных, так и криогенных газовых гидратов. Выявление по термобарическим признакам областей распространения подводных гидратов газа и оценка мощности зоны их стабильности требуют рассмотрения ряда параметров, одним из которых является геотермический градиент, являющийся индикатором геодинамической активности структур литосферы. В связи с чем, в основе всех представленных ранее работ лежит собственная оценка зонального распределения теплового потока (ТП) на шельфе СЛО. Цель данной работы – выполнить геотермическое картирование регионального масштаба акватории Евразийской континентальной окраины части СЛО на основе имеющегося ограниченного набора данных измерений геотермического градиента с учетом особенностей структурно-тектонического строения района исследования.

Материалы и методы

В силу недостаточности измерений теплового потока в акваториях для региональных оценок распределения теплового потока на Евразийской окраине СЛО для выполнения геотермического картирования нами был выбран метод геотермического районирования, основанный на связи глубинного теплового потока с возрастом последней тектономагматической активизации. Данный метод основывается на выведенной Б.Г. Поляком и Я.Б. Смирновым [Поляк, Смирнов, 1966; Смирнов, 1968] закономерности, согласно которой тепловой поток уменьшается обратно пропорционально возрасту фаз тектоно-магматической активности (ТМА) от молодых структур к более древним, асимптотически приближаясь к минимальному значению около 36–40 мВт/м² в древнейших (дорифейских) блоках. С

использованием данного метода в 80-х годах XX века коллективом ВНИИОкеангеологии под руководством В.А. Соловьева были построены первые прогнозные карты условий гидратоносности недр СЛО, соответствующие степени геологической изученности, а также карта глубинного теплового потока СССР, составленная в Геологическом институте АН СССР [Кутас и др., 1975].

Геотермическое картирование СЛО выполнялось согласно следующей последовательности: в качестве тектонической основы для районирования и анализа возраста тектонических структур была выбрана тектоническая карта Арктики масштаба 1:10 000 000 TEMAR-10 000, изданная в 2019 году совместно с ФГБУ «ВСЕГЕИ» и геологическими службами других приарктических государств [Тектоническая..., 2019]; с ее использованием была проведена кластеризация района исследования с учетом возраста последней ТМА. За ней последовали сбор данных геотемпературных измерений в пределах СЛО и создание базы геотермических данных из доступных источников, где в качестве исходного массива выступила глобальная база данных теплового потока Global Heat Flow Database [Fuchs, Norden, 2021]. С ней была проведена верификация данных температурных измерений; дополнение массива данных о ТП, полученных на основе измерений термоградиента данными о глубине залегания Bottom simulating reflector (BSR); оценка коэффициента теплопроводности (КТ) отложений; статистический анализ геотермических данных, определение и районирование средних значений ТП согласно выделенным структурно-тектоническим единицам (кластерам) в зависимости от возраста их последней ТМА средствами библиотеки Geopandas для Python; пересчет значений ТП в значения ТГ согласно принятому КТ.

Результаты

В результате генерализации на структурно-тектонической схеме, в пределах Евразийской части СЛО выделены 42 структурно-тектонические единицы. По времени последней ТМА каждая из структурных единиц была отнесена к группе с близким возрастом ТМА и по этим группам составлены соответствующие выборки геотермических данных для расчета средней величины ТП. Таким образом, на основе возраста последней ТМА 42 структурные единицы объединены в 18 структурно-тектонических кластеров, каждый из которых характеризуется определенным этапом последней ТМА. Всего на структурно-тектонической схеме Евразийской окраины СЛО выделено шесть таких временных этапов – современный (позднекайнозойский), альпийский (раннекайнозойский), киммерийский (мезозойский), герцинский (позднепалеозойский), каледонский (раннепалеозойский) и докембрийский. Дополнительно, в качестве отдельных кластеров выделены области развития мелового вулканизма. В море Лаптевых база геотермических данных была дополнена значениями термоградиента, рассчитанными по глубине залегания BSR. Поскольку данные по распределению коэффициента теплопроводности в Арктических морях и СЛО практически отсутствуют, а целевым объектом данного исследования является распределение ТГ в неконсолидированных отложениях, для всех отложений до глубины 1000 метров нами принято значение КТ 1,3 Вт/м·К, согласно работе [Хуторской, Подгорных, 2001]. Для определения среднего значения, с выборками измерений ТП был проведен анализ их эмпирических функций распределения. В результате чего было установлено, что удаление статистических "выбросов" из выборки не приводит к сильному изменению среднемедианного значения, при этом функция распределения выборок начинает стремиться к нормальному виду (Рис. 1).

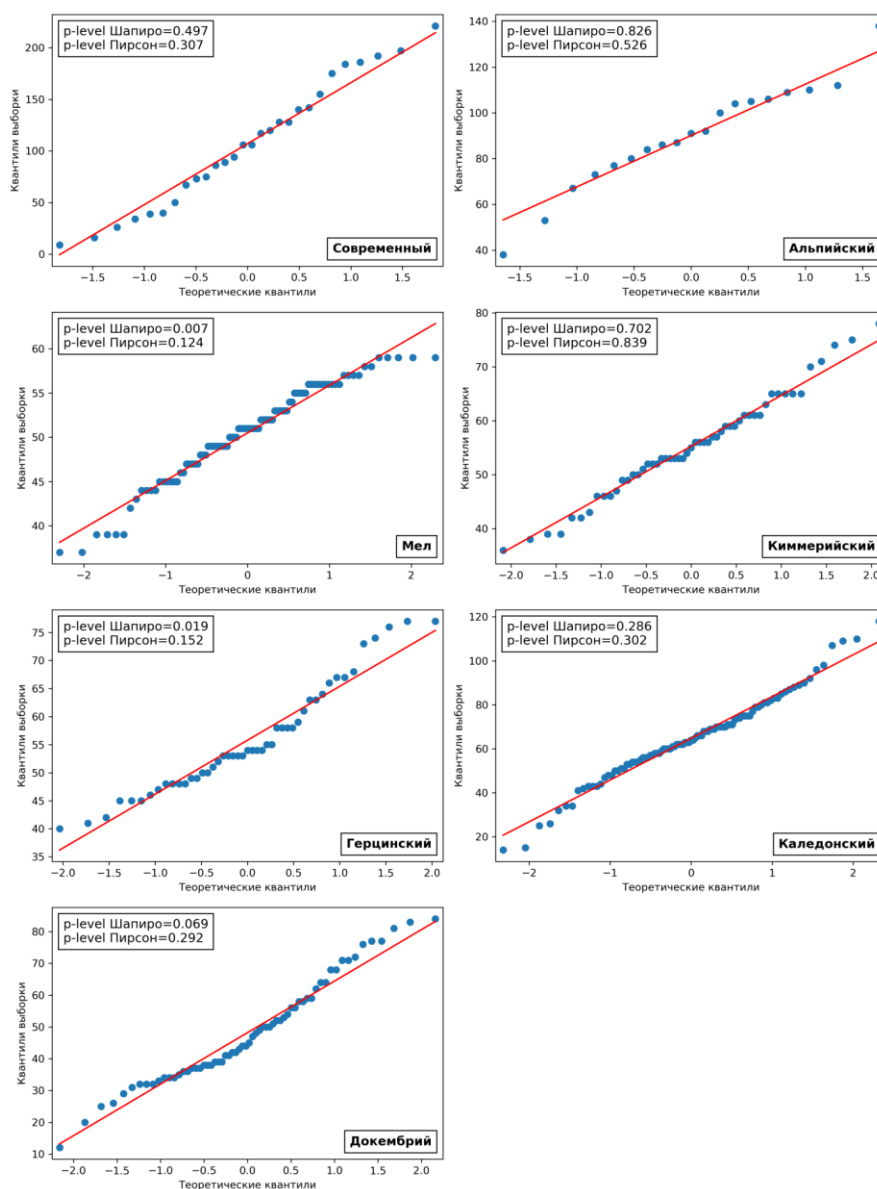


Рис 1. Графики вида Квантиль-квантиль (QQ-plot) для выборок результатов измерений по разновозрастным структурам

Исходя из этих соображений, в качестве среднего значения для кластера ТМА нами было принято медианное значение для каждой выборки. С учетом принятого среднего значения КТ, геотермический градиент для зон возраста ТМА составил: современная – 82 мК/м; альпийская – 70 мК/м; меловая – 39 мК/м; киммерийская – 42 мК/м; герцинская – 41,5 мК/м; каледонская – 49 мК/м; докембрийская – 34 мК/м.

Заключение

В результате проведенного исследования была создана региональная геотермическая карта Евразийской окраины СЛО. Получены среднемедианные значения теплового потока для отдельных структур Евразийской окраины. В акватории моря Лаптевых в геотермическом районировании были учтены сейсморазведочные материалы о положении BSR. Геотермическое картирование такого масштаба с привлечением актуальных измеренных и расчетных геотермических данных выполнено впервые. Материал лег в основу последующих работ по моделированию СММП и ЗСГГ на шельфе СЛО.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания.

Список литературы:

1. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Тепловой поток на континентах // ДАН СССР. 1966. Т. 168, № 1. С. 170–172.
2. Смирнов Я.Б. Связь теплового потока со строением и развитием земной коры и верхней мантии // Геотектоника. 1968. № 6. С. 3-25.
3. Кутас Р.И., Любимова Е.А., Смирнов Я.Б. Геолого-геофизический анализ и карта тепловых потоков для территории Европейской части СССР. Исследования теплового и электромагнитного полей в СССР. М.: Наука. 1975. 20-27.
4. Тектоническая карта Арктики / ред. О.В. Петров, М. Пубелье (ВСЕГЕИ/CGMW). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2019
5. Fuchs S., Norden B. International Heat Flow Commission: The Global Heat Flow Database: Release 2021. GFZ Data Services. 2021.
6. Хуторской М.Д., Подгорных Л.В. Объемная модель геотермического поля Баренцевоморского региона // ДАН. 2001. Том 377. № 1. С. 265-269.

УДК 550.34.03

Рубрика 38.63.00

СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ЭНДОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ
МОРЕЙ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

CREATING THE DATABASE OF ENDOGENIOUS GEOLOGICAL HAZARDS OF THE
RUSSIAN ARCTIC SEAS

Новиков М.А.^{1,2}, **Крылов А.А.**^{1,2}, **Рукавишникова Д.Д.**¹

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

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

Novikov M.A.^{1,2}, **Krylov A.A.**^{1,2}, **Rukavishnikova D.D.**¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Vladivostok*

В последние десятилетия Российская Арктика привлекает все больше внимания в связи с изменениями климата и расширением возможностей для исследований и экономической деятельности. Однако, при освоении Арктики приходится сталкиваться с обширным комплексом различных геопасностей. Целью данной работы является создание базы данных (БД) эндогенных геологических опасностей морей Российской Арктики, что позволяет собрать и систематизировать информацию о таких опасностях, лучше понять и спрогнозировать возможные угрозы, а также разработать соответствующие меры безопасности.

При заполнении БД были использованы сейсмологические данные, полученные в ходе морских экспедиций при участии ИО РАН и ТОИ ДВО РАН [1, 2], а также из электронных ресурсов глобальных и региональных профильных организаций, таких как USGS, ISC, ЕГС РАН [3, 4, 5]. Кроме того, было проанализировано множество литературных источников информации (научная периодика, геологические карты, атласы и проч.) о сопряженных геологических элементах, включая активные разломы и крупные геологические структуры, газовых сипах [6, 7], подводных оползнях [8, 9], заплесках цунами [10, 11] и др. Данные были приведены к унифицированному формату в соответствии с третьей нормальной формой (3NF). Каждому классу объектов соответствует отдельная таблица базы данных. На рисунке 1 приведен фрагмент структуры базы данных с демонстрацией связей один ко многим.

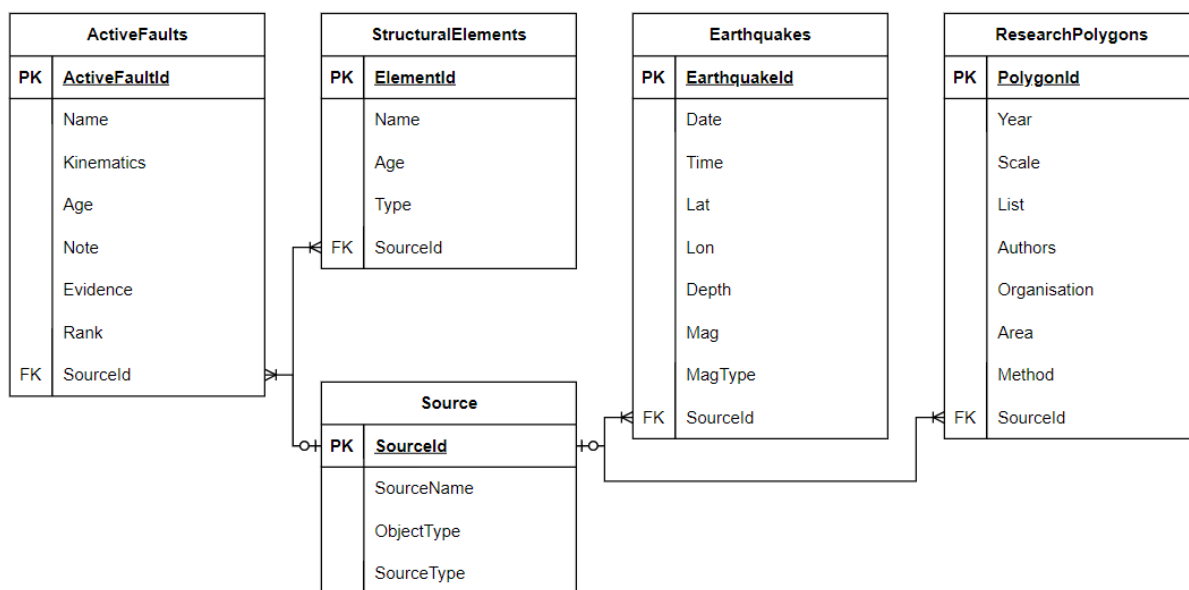


Рисунок 1. Фрагмент структурной схемы базы данных

Для формирования базы данных была выбрана система управления базами данных SQLite, поскольку она легка в использовании, не требует сложной установки и конфигурации, работает на широко используемом декларативном языке программирования SQL и является кроссплатформенной. Всего в базу входит 15422 самостоятельных записей, каждая из которых содержит соответствующие метаданные.

Для визуализации собранных данных была создана интерактивная карта арктических геопасностей на платформе Mapbox. На карте различными слоями показаны приведенные в базе данных классы объектов. При помощи HTML и JavaScript-библиотеки Mapbox GL JS был разработан дополнительный функционал карты. Во-первых, было создано меню, позволяющее скрыть и показать различные слои карты. Кроме того, была разработана функция, позволяющая при нажатии на маркер на карте, открыть всплывающее окно с дополнительной информацией о конкретном событии. Для размещения карты был создан веб-ресурс проекта, на котором также размещена расширенная информация о проекте, список использованных источников, исходные данные и контакты создателей. В дальнейшем планируется расширение набора представленных геопасностей, развитие веб-сайта проекта и добавление англоязычной версии сайта.

Работа выполнена в рамках государственного задания № FMWE-2021-0004 (анализ положения крупных тектонических структур), при финансовой поддержке в рамках гранта РФ № 23-17-00125 (анализ свидетельств об активности разломов в море Лаптевых), гранта Президента РФ для поддержки молодых ученых № МК-45.2022.1.5 (картирование распределения землетрясений, разломов и газовых сипов в Арктических морях в контексте анализа геопасностей).

Список литературы:

1. Krylov, A.A., Lobkovsky, L.I., Rukavishnikova, D.D., Baranov, B.V., Kovachev, S.A., Dozorova, K.A., Tsukanov, N.V., Semiletov, I.P., 2022. New Data on Seismotectonics of the Laptev Sea from Observations by Ocean Bottom Seismographs. *Doklady Earth Sciences* 507, 936–940. <https://doi.org/10.1134/S1028334X2260059>
2. Krylov, A.A.; Egorov, I.V.; Kovachev, S.A.; Ilinskiy, D.A.; Ganzha, O.Y.; Timashkevich, G.K.; Roginskiy, K.A.; Kulikov, M.E.; Novikov, M.A.; Ivanov, V.N.; et al. Ocean-Bottom

Seismographs Based on Broadband MET Sensors: Architecture and Deployment Case Study in the Arctic. *Sensors* 2021, 21, 3979. <https://doi.org/10.3390/s21123979>

3. База данных «Землетрясения России», Единая Геофизическая служба Российской Академии наук, Электронный ресурс: <http://eqru.gsras.ru/>
4. U.S. Geological Survey. Электронный ресурс: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>
5. International Seismological Centre. Электронный ресурс: <https://doi.org/10.31905/D808B83>
6. Shakhova, N., Semiletov, I., Sergienko, V., Lobkovsky, L., Yusupov, V., Salyuk, A., Salomatin, A., Chernykh, D., Kosmach, D., Panteleev, G., Nicolsky, D., Samarkin, V., Joye, S., Charkin, A., Dudarev, O., Meluzov, A., Gustafsson, O. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 2015, 373, 20140451. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0451>
7. Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В. Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Доклады Академии наук. - 2019. - Т. 486. - №3. - С. 354-358. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863354-358>
8. Богоявленский В.И., Казанин А.Г., Кишанков А.В., Казанин Г.А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. 2021. Т.11, № 2. С. 178-194. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194.
9. Рыбалко А.Е., Захаров М.С., Щербаков В.А., Локтев А.С. Инженерно-геологическое районирование Арктического шельфа России // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2021. № 3, с. 52–68. УДК 624.131
10. Куликов Е. А., Иващенко А. И., Медведев И. П., Яковенко О.И, Файн И.В. Цунамиопасность арктического побережья России. Часть 1. Каталог вероятных цунамигенных землетрясений / // ГеоРиск. – 2019. – Т. 13, № 2. – С. 18-33. – <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-2-18-32> – ISSN: 1997-8669
11. Куликов Е. А., Иващенко А. И., Медведев И. П., Яковенко О.И, Файн И.В. Цунамиопасность арктического побережья России. Часть 2. Численное моделирование цунами. ГеоРиск. – 2019. – Т. 13, № 3. – С. 6-17 – <http://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-3-6-17> — ISSN: 1997-8669

УДК 551.462
Рубрика 38.47.19

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ДНА ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ОБСКОЙ ГУБЫ КАРСКОГО МОРЯ

THE MAIN FEATURES OF THE GEOMORPHOLOGICAL STRUCTURE OF THE BOTTOM OF THE CENTRAL PART OF THE OB BAY OF THE KARA SEA

Ермолов Александр Александрович¹, Кажукало Георгий Анатольевич¹, Огородов Станислав Анатольевич¹

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

Ermolov Alexander Aleksandrovich¹, Kazhukalo Georgii Anatolievich¹, Ogorodov Stanislav Anatolievich¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Освоение разведанных месторождений углеводородного сырья и строительство объектов транспортной и добычной инфраструктуры в Обской губе Карского моря имеет ключевое значение для обеспечения прогнозируемых объемов российской добычи и повышения гибкости экспортных поставок газа и газового конденсата. Оценка условий строительства и риска развития опасных процессов природного и техногенного характера невозможна без учета рельефа дна, истории его формирования и современной динамики.

Обская губа представляет собой мелководный залив Карского моря, вдающийся в сушу более чем на 800 км. Наибольшая ширина губы достигает 95 км, наименьшая – между мысами Каменный и Парусный – 35 км, общая протяженность береговой линии более 1800 км. По своему происхождению Обская губа – эстуарий, сформировавшийся в ходе послеледниковой трансгрессии. В течение 9 месяцев в году акватория Обской губы покрыта льдом. Направление и интенсивность постоянных, приливных, ветровых и иных течений в значительной степени обусловлены влиянием стока рек Оби и Таза и, как и колебания уровня моря, характеризуются ярко выраженной сезонной изменчивостью. Влияние приливов наиболее заметно в северной части губы, с учетом сгонно-нагонных явлений амплитуда колебаний уровня на отдельных участках может достигать 3,0 м.

Целью работы являлось создание региональной характеристики геоморфологического строения дна Обской губы. В качестве исходных данных о рельефе дна использовались морские навигационные карты и промерные планшеты ГУНиО масштаба 1:50000 – 1:100000. На основе ручной авторской обработки и интерпретации картографического материала была создана детальная цифровая модель рельефа (ЦМР) дна и батиметрическая карта с сечением изобат через 1,0 м масштаба 1:200000. Картографическое оформление, привязка, оцифровка и редакция авторских оригиналов карт выполнены в среде MapInfo Professional.

Благодаря достаточно крупному масштабу батиметрической карты удалось не только уточнить, но и существенно детализировать донный рельеф, выявить отдельные формы и их элементы. Соответственно увеличилась и степень информативности геоморфологической карты Обской губы, впервые составленной в масштабе 1:200000. Помимо батиметрических данных, для создания карты был привлечен большой объем литературных и архивных материалов по геоморфологии, геологии и палеогеографии Карского моря с целью

выявления морфоструктурных особенностей и генезиса отдельных форм рельефа. Береговая зона изучалась в ходе полевых работ в разные годы, при этом широко использовались данные дистанционного зондирования Земли, фондовые и литературные данные.

Оригинальная морфогенетическая легенда к карте разрабатывалась с учетом сложившихся представлений об условиях формирования рельефа арктических окраин и результатов исследований морфологии дна Печорского моря и Байдарацкой губы Карского моря [Авенариус и др., 2001; Бирюков и др., 2008; Бирюков, Огородов, 2003; Печорское море, 2003]. Морфогенетический подход позволил охватить все важнейшие особенности рельефа с учетом масштаба объектов и степени их генерализации на карте, а пространственно-временной анализ дополнил общую картину его развития. Важно подчеркнуть, что разработанная карта может быть основой и для других тематических карт Обской губы, таких как карта современных донных осадков, интенсивности воздействия ледяных образований на дно, динамики берегов и др.

На заключительном этапе геоморфологического картографирования выполнено описание донного рельефа с целью создания региональной характеристики геоморфологического строения дна Обской губы, определения механизмов и основных этапов рельефообразования, уточняющих существующие представления и направленные на решение фундаментальной проблемы реконструкции условий формирования рельефа дна мелководных заливов Карского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Кроме того, с помощью батиметрической карты был построен ряд поперечных гипсометрических профилей и проведено трехмерное моделирование рельефа, которое обладает рядом несомненных преимуществ перед плоскими изображениями и является традиционным средством отображения подводных равнин. Наглядная визуальная оценка морфологии и возможность точного морфометрического анализа делают подобные модели удобным инструментом при изучении рельефа, а сама ЦМР является основой для проведения дальнейших прикладных исследований в области геоакустики, геологии, геокриологии, геоморфологии, геофизики и инженерных изысканий. В рамках данного проекта цифровая трехмерная модель рельефа использована в качестве основы для составления геоморфологической карты, отражающей происхождение, возраст и историю развития рассматриваемой территории.

Материалы публикации подготовлены в рамках выполнения работ по госбюджетной теме НИР лаборатории геоэкологии Севера географического ф-та МГУ имени М.В. Ломоносова 121051100167-1.

Список литературы

1. *Авенариус И.Г., Ермолов А.А., Мысливец В.И., Репкина Т.Ю.* Рельеф и некоторые аспекты палеогеографии позднего валдая - голоцена в районе о. Варандей (Баренцево море) // Сборник статей «Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перегляциала» / Под ред. Э.В. Шипилова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2001. - С. 135–147.
2. *Бирюков В.Ю., Ермолов А.А., Огородов С.А.* Рельеф дна Байдарацкой губы Карского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2008. № 3. С. 80–84.
3. *Бирюков В.Ю., Огородов С.А.* Рельеф дна Печорского моря. Труды Ин-та океанологии РАН. 2003. - №4. - С. 105-110.
4. Печорское море. Системные исследования / под ред. Романкевича Е.А., Лисицына А.П., Виноградова М.Е. - М.: Море. 2003. - 486 с.

УДК 551.463.8

Рубрика 38.61.17

СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЗИМНИЙ СЕЗОН НА МЫСЕ ЧЕЛЮСКИНА ПО
ДАНЫМ БОЛЬШОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ 2022-2023 ГОДЫ

COMPOSITION OF SNOW COVER IN THE WINTER SEASON AT CAPE CHELYUSKIN
ACCORDING TO THE GREAT ARCTIC EXPEDITION 2022-2023

**Новигатский Александр Николаевич¹, Еремеев Артем Денисович², Родикова Вера
Геннадьевна², Ткачева Елена Сергеевна^{3,4}, Саввичев Александр Сергеевич^{2,5},
Шевченко Владимир Петрович¹**

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

²*ГБОУ Школа № 1553 имени В.И. Вернадского, Москва*

³*Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова*

⁴*ФГБУ Гидрометцентр России, Москва*

⁵*Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва*

**Novigatsky Alexander Nikolaevich¹, Yeremeev Artem Denisovich², Rodikova Vera
Gennadyevna², Tkacheva Elena Sergeevna^{3,4}, Savvichev Alexander Sergeevich^{2,5},
Shevchenko Vladimir Petrovich¹**

¹*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*Vernadsky School No. 1553, Moscow*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow*

⁴*Hydrometcenter of Russia, Moscow*

⁵*Vinogradsky Institute of Microbiology, Research Centre of Biotechnology RAS, Moscow*

Введение

Арктика, по отношению к климатическим изменениям – самый уязвимый, но и самый значимый регион Северного полушария. Наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата на нашей планете особенно сказываются на состоянии окружающей среды в северных регионах и на процессах, его определяющих. Снежный покров играет фундаментальную роль в наземных экосистемах, поскольку влияет на количество и качество воды, глобальные биогеохимические циклы и свойства почвы [Виноградова, Иванова, 2017].

Начавшееся с середины-конца прошлого столетия интенсивное промышленное освоение месторождений нефти и газа на севере Западной Сибири, цветных металлов на севере Центральной Сибири, угля в Якутии приводит к необратимым изменениям экосистем Арктики [Телятников и др., 2014; Черногаева и др., 2019].

Состав снежного покрова является одним из факторов, воздействующих на гидрохимический режим территории. Формирование химического состава снежного покрова в российской Арктике происходит под влиянием естественных и антропогенных факторов, их соотношение зависит от расстояния от крупных промышленных центров и особенностей формирования гидрометеорологического режима территорий и акваторий [Котова, 2019].

За последние 30 лет частоты поступления в Российскую Арктику воздушных масс с континентов уменьшились. Соответственно состав воздуха и осадков там становится все более морским, что может проявиться в изменении свойств находящихся на поверхности природных объектов – почв, вод, растений и т.д. Межгодовые вариации в процессах циркуляции атмосферы велики, что приводит к сильным различиям от года к году концентраций антропогенных тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) в воздухе и их потоков на поверхность [Виноградова, Иванова, 2017].

Таймырский полуостров располагается в арктической и субарктической зонах, что определяет крайнюю суровость климата. Здесь представлены три природные зоны – полярных пустынь, тундры и лесотундры. Повсеместно развита многолетняя мерзлота, наличие которой стимулирует образование криогенного микро- и мезорельефа (полигонального, пучинного, термокарстового). Преобладают тундровые, глеевые и арктические почвы. Полярные пустыни на Таймыре отмечаются только в районе мыса Челюскин. Они отличаются незначительным растительным разнообразием – не более 60 видов сосудистых растений, приспособленных к крайне суровым условиям [Аллер, 1936; Телятников и др., 2014].

Характерной особенностью атмосферных аэрозолей, является многокомпонентность состава и широкий диапазон изменения содержания отдельных составляющих. Одновременное наличие в составе атмосферных аэрозолей частиц минерального, биологического и антропогенного происхождения, низкая массовая концентрация полученных образцов затрудняют их химический анализ, оценку атмосферного переноса вещества. Без знания этих характеристик невозможно составить представление о региональном геохимическом фоне и состоянии экосистем в целом [Головко, Чанкина, 2017].

Материалы и методы

В рамках социально-значимого образовательного проекта Департамента образования и науки города Москвы «Большая Арктическая Экспедиция» (БАЭ), в экспедиционный этап «Арктическая Наука» в мае 2022 и апреле 2023 гг. был выполнен отбор проб снега на мысе Челюскин, школьниками ГБОУ Школа № 1553 имени В.И. Вернадского (табл. 1). Отбор проб снега проводился химически чистым пробоотборным оборудованием методом шурфа и площадного сбора в особо чистые пластиковые боксы. После таяния снега при комнатной температуре в лаборатории на мысе Челюскин, пробы были профильтрованы методом мембранной ультрафильтрации на лавсановые ядерные и GF/F фильтры [Шевченко и др., 2009].

Таблица 1. Отбор проб снега на мысе Челюскин, БАЭ 2022–23 гг.

Дата	Координаты, с.ш.	Координаты, в.д.	Тип отбора/ ДхШхВ, см	Концентрация, мг/л	Топопривязка
28.05.2022	77°43.001'	104°18.001'	Площадной/ 20x10x3	2,16	ОГМС им. Е.К. Федорова, рядом с главным зданием
25.05.2022	77°43.092'	104°18.089'	Площадной/ 20x10x3	1,17	ОГМС им. Е.К. Федорова, рядом с генераторной станцией
17.04.2023	77°42.498'	104°11.697'	Шурф/ 80x60x58	0,31	Залив Спартак, поверхность морского припая
20.04.2023	77°38.783'	104°04.731'	Шурф/ 60x45x35	0,20	Замерзшая река Кунар

После возвращения экспедиции, в Аналитической лаборатории Института океанологии РАН был определен вещественный состав нерастворимых частиц снежных проб выделенных на ядерный фильтр с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3 с микрозондовой приставкой INCA MAX50.

Результаты и обсуждение

Концентрация нерастворимых частиц снежных проб отобранных в центральной части полярной станции «Объединенная гидрометеорологическая станция им. Е.К. Федорова» (ОГМС им. Е.К. Федорова) в разы выше (таблица), нежели чем в более отдаленных районах от станции (залив Спартак, река Кунар). Кроме того, это может быть связано с разными типами отбора проб, поскольку площадной отбор подразумевает снятие верхнего слоя снега (уже подтаявшего в конце мая), а шурф – на всю глубину снежного покрова, накопленного за весь зимний сезон.

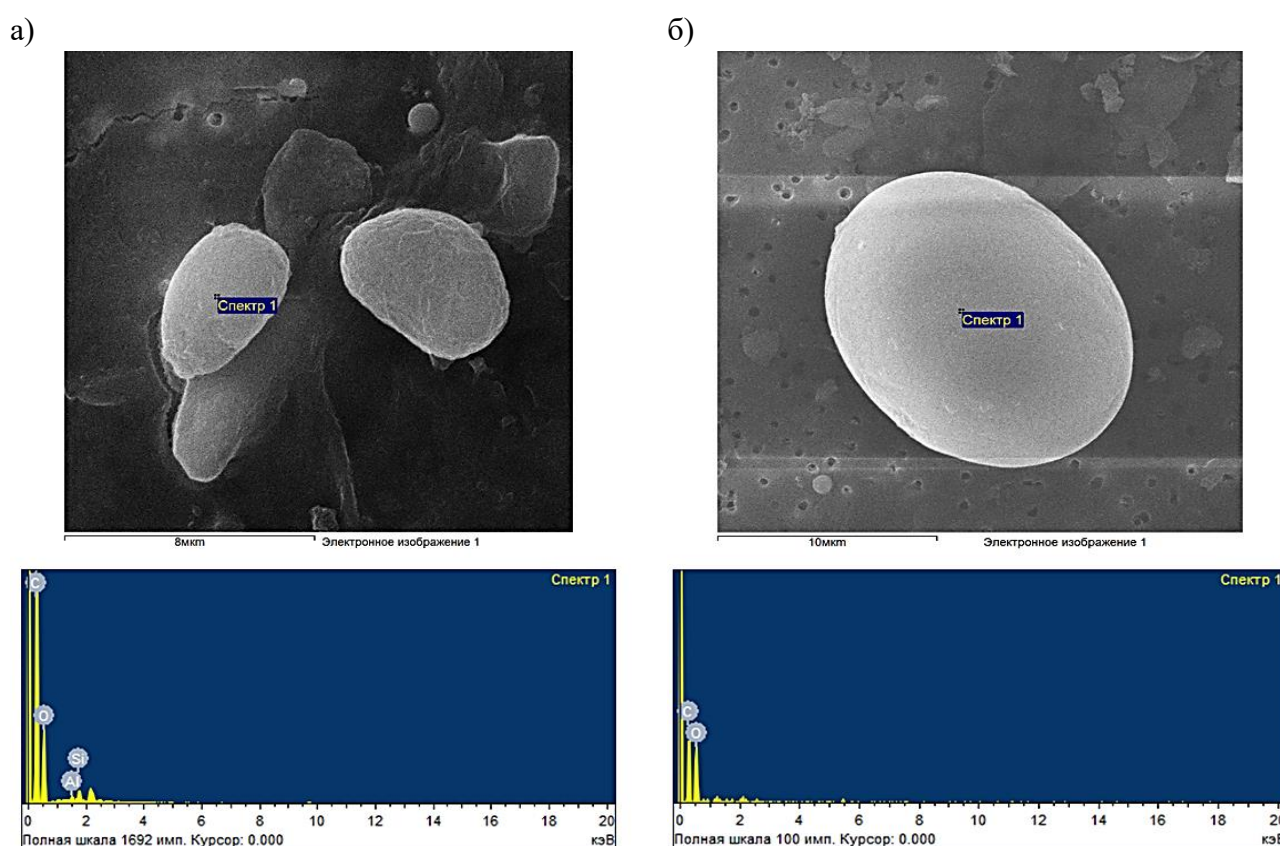


Рис. 1. Природные биогенные нерастворимые компоненты в снежном шурфе на льду р. Кунар, п-ов Челюскин, апрель 2023 г.: а) пыльца высших растений; б) спора грибов, или пыльца высших растений. Визуализация на лавсановом ядерном фильтре получена с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3, элементный состав получен с помощью микрозондовой приставки INCA MAX50.

В наших исследованиях важно выделить природную и техногенную компоненты аэрозольного переноса. Природная компонента атмосферного аэрозоля представлена минеральной и биогенной фракциями, резко отличающимися по своему составу. Наиболее распространенные в земной коре Si и Al не играют существенной роли в строении живого вещества, тогда как Co, Cu, Mo, Se, Cd и другие элементы, не отмеченные высокой распространенностью, присутствуют в живых тканях. В настоящее время в живых тканях

обнаружены практически все элементы, известные на поверхности Земли, но в незначительных количествах. Доминируют в биогенной компоненте лишь шесть элементов: Н, О, N, С, Р, S [Головко, Чанкина, 2017].

Высшие растения продуцируют огромное количество пыльцевых зерен или спор, которые, попадая на поверхность суши или воды, захороняются и переходят в ископаемое (фоссильное) состояние, становясь компонентом отложений. За период цветения одна береза может продуцировать примерно 1,5 кг пыльцы [Головко, Чанкина, 2017]. В обработанных нами пробах, в биогенной составляющей снежного покрова, преобладают споры и пыльца высших растений с доминирующими элементами С и О (рис. 1).

В геологическом плане п-ов Челюскин входит в Таймыро-Североземельскую минерагеническую провинцию, где проходит Центрально-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфировый пояс, который протягивается на расстояние более 900 км и достигает максимальной ширины в 80 км на п-ове Челюскин. Ведущую роль в его формировании играют позднепалеозойско-раннемезозойские гипабиссальные умереннощелочные гранит-порфировые и монзонит-граносиенит-порфировые рудоносные интрузии [Проскурин и др., 2021]. Четвертичные, постплиоценовые отложения на п-ве Челюскин имеют довольно широкое распространение. По характеру происхождения их можно разделить на две основные группы: морские и ледниковые. Отложения, относимые к группе морские, представлены песками, супесями, илами, сланцеватыми и несланцеватыми глинами, галечниками и ракушечниками. Отложения ледниковой группы представлены моренным материалом (моренами), флювиогляциальными осадками и эратическими валунами [Аллер, 1936].

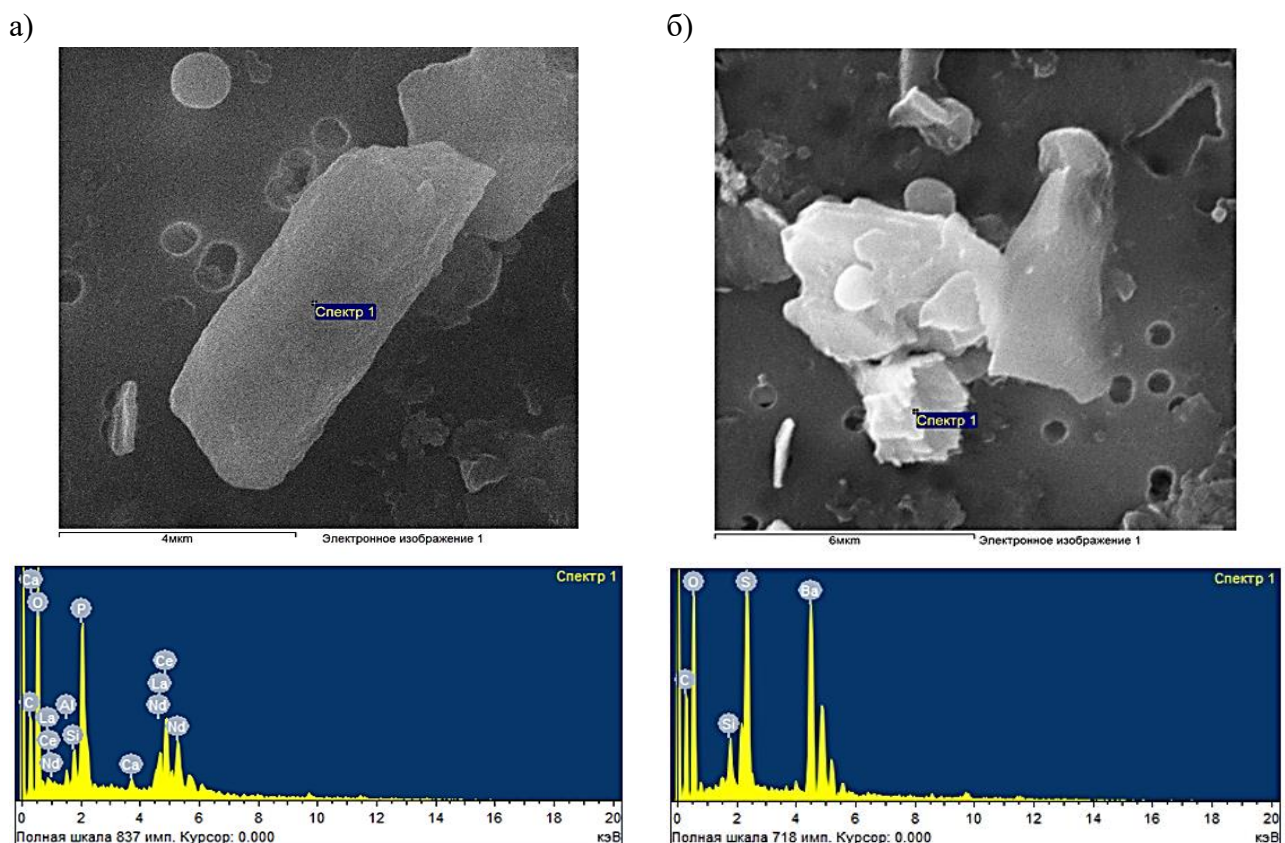


Рис. 2. Природные литогенные нерастворимые компоненты в снежном шурфе на льду р. Кунар, п-ов Челюскин, апрель 2023 г. Минеральные зерна из состава вмещающих пород п-ва Челюскин: а) минерал группы апатита с общей формулой $Ca_5(PO_4)_3$, часто содержит примеси Al, Si, Ti и др., а также редкоземельные элементы La, Ce, Nd и др.; б) барит, минерал бария

(сульфат), $BaSO_4$. Визуализация на лавсановом ядерном фильтре получена с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3, элементный состав получен с помощью микрозондовой приставки INCA MAX50.

В снежном шурфе, отобранном на р. Кунар, отчетливо выделяются минералы группы апатита и сульфата бария (рис. 2), поступающие в снежный покров посредством выветривания поверхностных отложений.

Образование и выбросы черного углерода в атмосферу происходит не только при природных пожарах, но и в процессе горения органических соединений, например, при работе дизельных установок, отоплении помещений углем, дровами и мазутом. Аэрозольные частицы, включающие черный углерод, оказывают влияние на климат: поглощают солнечную энергию и излучают инфракрасную (тепловую) радиацию, а также после выпадения на земную поверхность изменяют альбедо, что приводит к ее дополнительному разогреву. Эти эффекты наиболее критичны в зонах, покрытых снегом и льдом (в полярных областях и горных районах), в которых ускоряется таяние [Смирнов и др., 2015].

В обработанных нами пробах снежного покрова присутствует большое количество сфер сгорания органического топлива, а также хлопьевидные компоненты ржавчины (рис. 3). Это связано с интенсивной круглогодичной эксплуатацией полярной станции ОГМС им. Е.К. Федорова, а также полярного аэродрома «Мыс Челюскин».

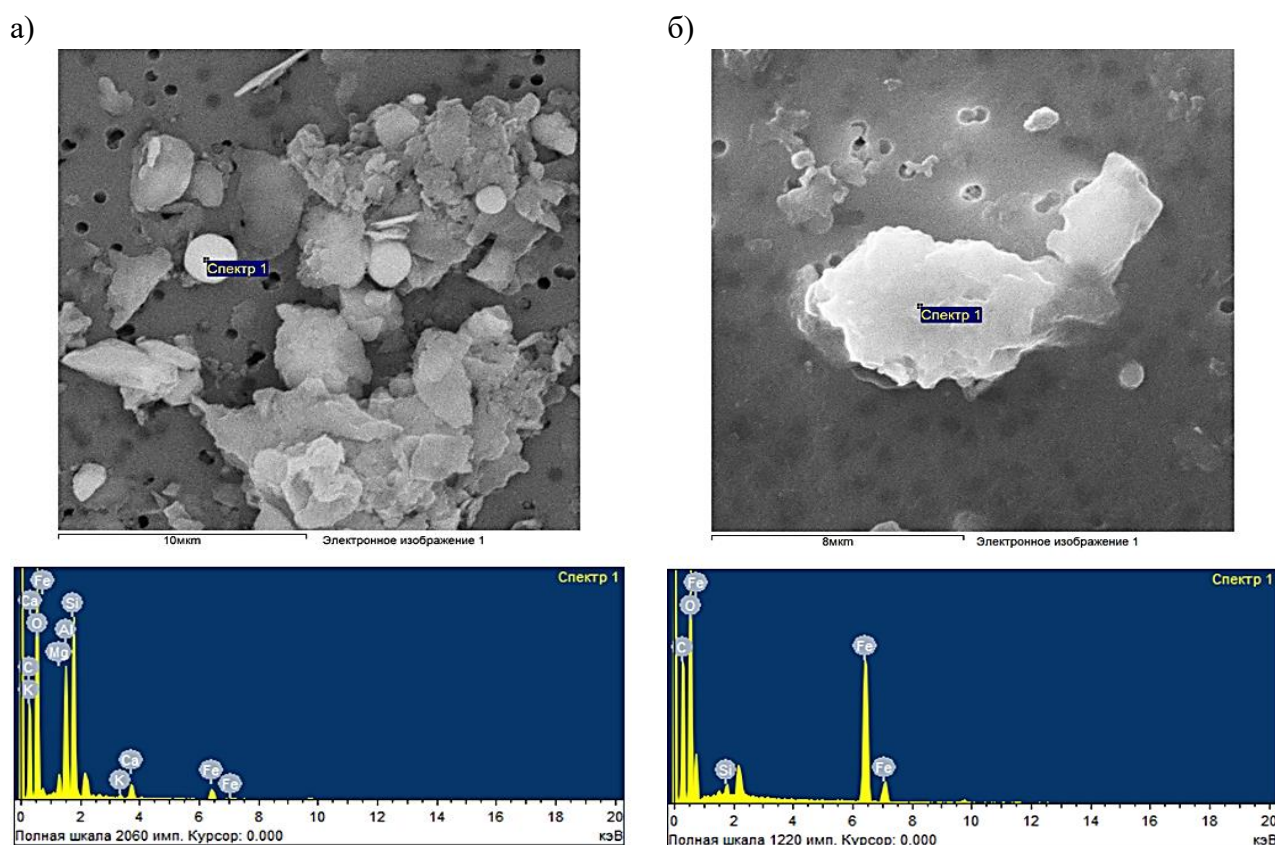


Рис. 3. Антропогенные нерастворимые компоненты в снежном шурфе на льду р. Кунар, п-ов Челюскин, апрель 2023 г.: а) сфера сгорания угля содержит оксиды Al, Si, Fe, Mg, Ca, K; б) хлопьевидные компоненты ржавчины, оксид железа Fe_2O_3 . Визуализация на лавсановом ядерном фильтре получена с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3, элементный состав получен с помощью микрозондовой приставки INCA MAX50.

Заключение

Большая часть населения России проживает в условиях, требующих улучшения состояния окружающей среды. Эта ситуация обусловлена прежде всего отсутствием эффективного экономического механизма снижения уровня загрязнения окружающей среды, способного стимулировать субъекты хозяйствования к сокращению выбросов и сбросов загрязняющих веществ, а также ограниченными ресурсами, сдерживающими перевод объектов на работу по наилучшим доступным технологиям и внедрение современного пылегазо- и водоочистного оборудования, установок и сооружений [Черногаева и др., 2019].

Проведенные нами исследования снежного покрова отобранного в апреле-мае 2022-23 годах на мысе Челюскин показывают существенный вклад антропогенного фактора в общий состав нерастворимых частиц в снеге. Так, наряду с природными минеральными и биогенными компонентами практически во всех пробах присутствуют сферы сгорания ископаемого топлива и хлопья ржавчины.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках социально-значимого образовательного проекта Департамента образования и науки города Москвы «Большая Арктическая Экспедиция» (экспедиционный этап «Арктическая Наука»). Обработка материала выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-17-00234-П. В рамках Государственного задания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0016 осуществлялась интерпретация полученных данных.

Список литературы:

1. Аллер Г.Д. Постплиоценовые отложения полуострова Челюскина // Известия Государственного географического общества. – 1936. – Т. 68. – №. 3. – С. 314–337.
2. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Перенос воздушных масс и загрязнений к арктическим островам России (1986-2016 гг.): долговременные, межгодовые и сезонные вариации // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16. – №. 4. – С. 5–20.
3. Головки В.В., Чанкина О.В. Элементный состав пыльцы растений, присутствующей в воздухе Новосибирска // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 4. – №. 2. – С. 115–119.
4. Котова Е. И. Оценка влияния факторов на состав снежного покрова в Российской Арктике // Успехи современного естествознания. – 2019. – №. 10. – С. 158–163.
5. Проскурнин В.Ф., Петров О.В., Романов А.П., Курбатов И.И., Гавриш А.В., Проскурнина М.А. Центральнo-Арктический золотосодержащий медно-молибден-порфиновый пояс // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 85. – С. 31–49.
6. Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Выбросы черного углерода от природных пожаров на землях лесного фонда Российской Федерации в 2007–2012 гг. // Метеорология и гидрология. – 2015. – №. 7. – С. 5–17.
7. Телятников М.Ю., Банаев Е.В., Онучин А.А., Шишкин, А.С. Характеристика природных экосистем и основных дестабилизирующих факторов севера Центральной Сибири // Сибирский экологический журнал. – 2014. – Т. 21. – №. 6. – С. 803–806.
8. Черногаева Г.М., Жадановская Е.А., Журавлева Л.Р., Малеванов Ю.А. Загрязнение окружающей среды в регионах России в начале XXI века. М.: ООО «ПОЛИГРАФ-ПЛИУС». – 2019. – 232 с.
9. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Горюнова Н.В. Атмосферные аэрозоли как источник осадочного вещества и загрязнений в Северном Ледовитом океане. В кн.: «Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития». М.: Изд-во МГУ. – 2009. – С. 150–172.

УДК 551.4.042

Рубрика 39.01.19

УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ РАЗЛИЧНЫХ ФРАКЦИЙ НА ЭРОЗИОННОМ ПЛЯЖЕ (ПОБЕРЕЖЬЕ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ)

CONDITIONS FOR THE ACCUMULATION OF SEDIMENTS OF DIFFERENT FRACTIONS ON AN EROSION BEACH (COAST OF THE KALININGRAD REGION)

Казаков Андрей¹, Данченков Александр Романович²

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

² *Институт Океанологии РАН имени П.П. Ширшова, Калининград*

Kazakov Andrei¹, Danchenkov Alexandr Romanovich²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Kaliningrad*

Введение

Внешний облик и физические характеристики береговых зон определяются свойствами слагающего их субстрата (чаще всего, смеси песка и гальки). В свою очередь, то или иное соотношение фракций в субстрате зависит от ряда параметров вдоль- и поперек берегового переноса материала – его интенсивности и направленности, мест его питания и разгрузки [1]. Антропогенное воздействие на потоки материала приводит к изменениям в строении пляжей, и результаты подобных изменений повсеместно наблюдаются на побережьях Калининградской области. Данное исследование рассматривает эрозионный пляж пос. Рыбное, субстрат которого сменился с песчаного на галечный.

Результаты

Полевой этап исследования включал в себя рекогносцировку и съемку полигона (участка пляжа протяженностью 630 м) при помощи БПЛА, выбор местоположения репрезентативных станций на профиле и отбор проб субстрата на станциях. Было выбрано 6 точек на участках, субстрат которых визуально отличался. Картограмма их расположения, характеризующая распределения масс в пробах, представлена на рис. 1. Совместно с отбором проб материала, слагающего непосредственно зону волнового наката, производились инструментальные измерения ее параметров - ширины и уклона, - и проводились гидрометеорологические наблюдения. Высоты волн и скорости ветра, а также их направления соответствовали климатическим нормам для летнего периода в данной зоне побережья Балтийского моря.

Лабораторный этап заключался в просушивании стационарных проб и их ситовом анализе. Результаты анализа представлены в таблице 1 (распределение масс разных фракций в пробах). По мере продвижения на северо-восток от точки 1 к точке 6 наблюдается замещение в пробах крупной гальки средним песком. Такие же результаты демонстрирует

специализированное программное обеспечение для анализа распределения фракций в пробах - Gradistat [2].

Этап обработки данных включал в себя подстановку полученных данных о субстрате и волнении в модели: зависимость уклонов от среднего размера субстрата. Данный этап не увенчался успехом: для лучшего соответствия результатов расчетов известным закономерностям необходимы более длинные ряды наблюдений.



Рис. 1 - Схема расположения станций и распределение фракций в пробах субстрата

№ пробы / Диаметр сита (мм)	2.5	1	0.5	0.25	Средний размер в пробе (мм)
1	79.16	11	7.55	2.4	2.825
2	69	4.5	11.34	15.1	2.458
3	46.3	14.76	13	24.4	1.952
4	34.35	10.15	15.02	39.05	1.557
5	12.02	20.21	26.4	37.37	1.091
6	37.73	54.75	6.45	1	2.236

Табл. 1 - Массы (г) фрагментов проб, оставшиеся на ситах соответствующего диаметра

Выводы

Исследование, являясь первым шагом к работе с более длинными временными рядами и более полными наборами данных о субстрате, продемонстрировало замещение гальки песком при движении по профилю вдаль от берегозащитных сооружений. Такое замещение наблюдается на фотографиях местности со станций, на фотографиях проб и в классификации, составленной специализированным ПО в результате ситового анализа проб. Результаты соответствуют общим закономерностям о связи размера субстрата и уклона зоны волнового наката [3]. Применимость формул ограничена малым количеством проб и коротким промежутком наблюдений. Авторы надеются получить более

качественные результаты в последующих изысканиях с привлечением расширенных рядов данных.

Благодарность

Авторы благодарят организаторов VI Международной летней школы "Береговая зона моря: исследования, управление и перспективы", проведенной в рамках Плавучего университета 2023 за предоставленные условия проведения исследования и возможности для профессионального развития.

Список литературы:

1. Bujan N., Cox R., Masselink G. From fine sand to boulders: Examining the relationship between beach-face slope and sediment size // *Marine Geology*. 2019. V. 417. P. 106012.
2. Blott, Simon J., and Kenneth Pye. 'GRADISTAT: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments'. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, no. 11 (October 2001): 1237–48. <https://doi.org/10.1002/esp.261>.
3. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. М: Изд. АН СССР, 1962. 710 с.

УДК 551.462.2

Рубрика 38.47.19

ОСАДОЧНЫЕ ВОЛНЫ НА ПЛАТО САНТА-КАТАРИНА: МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ

SEDIMENT WAVES ON THE SANTA CATARINA PLATEAU: MORPHOLOGY AND FORMATION PROCESSES

Попов Михаил Сергеевич¹, Борисов Дмитрий Геннадьевич¹

¹*Институт Океанологии РАН им. П.П. Ширшова, г. Москва, e-mail: mihael.popov99@gmail.com*

Popov Mikhail Sergeevich¹, Borisov Dmitriy Gennadievich¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow*

Осадочные волны – это серии волнообразных осадочных тел аккумулятивного происхождения (Wynn, Stow, 2002). Эти тела широко распространены на континентальных окраинах и абиссальных равнинах. Они характеризуются такими параметрами, как расстояние между гребнями (длина волн) высота гребней. Области распространения указанных осадочных тел получили названия «поля осадочных волн». Такие поля могут занимать площади в десятки тысяч квадратных километров.

На данный момент существует ряд основных подходов к классификации осадочных волн: по генезису, по гранулометрическому составу слагающих их осадков и по морфометрическим характеристикам. На основании процессов, ответственных за формирование осадочных волн их разделяют на волны, сформированные придонными течениями (контуритовые), и на волны, образованные турбидными потоками (Wynn, Stow, 2002). Под придонными течениями в данном контексте понимаются это квазипостоянные потоки воды, находящиеся в длительном взаимодействии с дном (в геологическом масштабе времени) и способные эродировать дно, транспортировать взвешенные частицы и отлагать осадочный материал.

Исследование морфологии, ориентации и внутренней структуры контуритовых осадочных волн позволяет получить важные сведения об интенсивности и доминирующих направлениях придонных течений в геологическом прошлом. Особенно актуальны такие исследования в районах, являющихся ключевыми для распространения глубинных и донных вод антарктического происхождения. Район работ охватывает переходную зону, в которой, главным образом, происходит обмен глубинных и донных вод между Аргентинской и Бразильской котловинами. Здесь, на крупном глубоководном плато Санта-Катарина (3400 – 4000 м), ранее было обнаружено поле осадочных волн (Jeck et al., 2019; Borisov et al., 2020; Frey et al., 2022), однако детального изучения их морфологии и не проводилось. Придонная циркуляция на плато контролируется водами антарктического происхождения, но до сих пор остается мало изученной. Известно, что в данном районе придонные течения демонстрируют сильную изменчивость по скорости и направлению (вплоть до противоположного в течение года). Задачами данной работы являлось детальное изучение морфологии и размеров осадочных волн на плато Санта-Катарина, уточнение границ распространения этих волн, а также анализ морфологии и пространственной ориентации осадочных волн в сравнении с результатами численного моделирования скоростей и направлений придонных течений.

Материалы и методы.

Основой для работы послужили данные многолучевого эхолотного промера рейсов KN 159-05 (судно Knorr, Oppo Delia, Scientist, Chief, Woods Hole Oceanographic Institution, 1998) и RC 2804 (судно R.D. Conrad, Flood Roger, Chief Scientist, Lamont-Doherty Earth Observatory, 1987), взятые из международной батиметрической базы данных GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans).

Для оценки влияния придонных течений на осадконакопление в районе исследования были использованы данные числового моделирования придонной циркуляции вод с помощью сигма-модели общей циркуляции океана Института вычислительной математики (ИВМ) РАН – INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model) (ССЫЛКА).

Для подтверждения природы выявленных осадочных тел были использованы данные высокоразрешающего сейсмоакустического профилирования, выполненного с помощью параметрического эхолота-профилографа SES 2000 deep (Innomar Technologie, Германия) в 33-, 35-, 37-, 52- рейсах НИС «Академик Иоффе» (2011-2016 гг.).

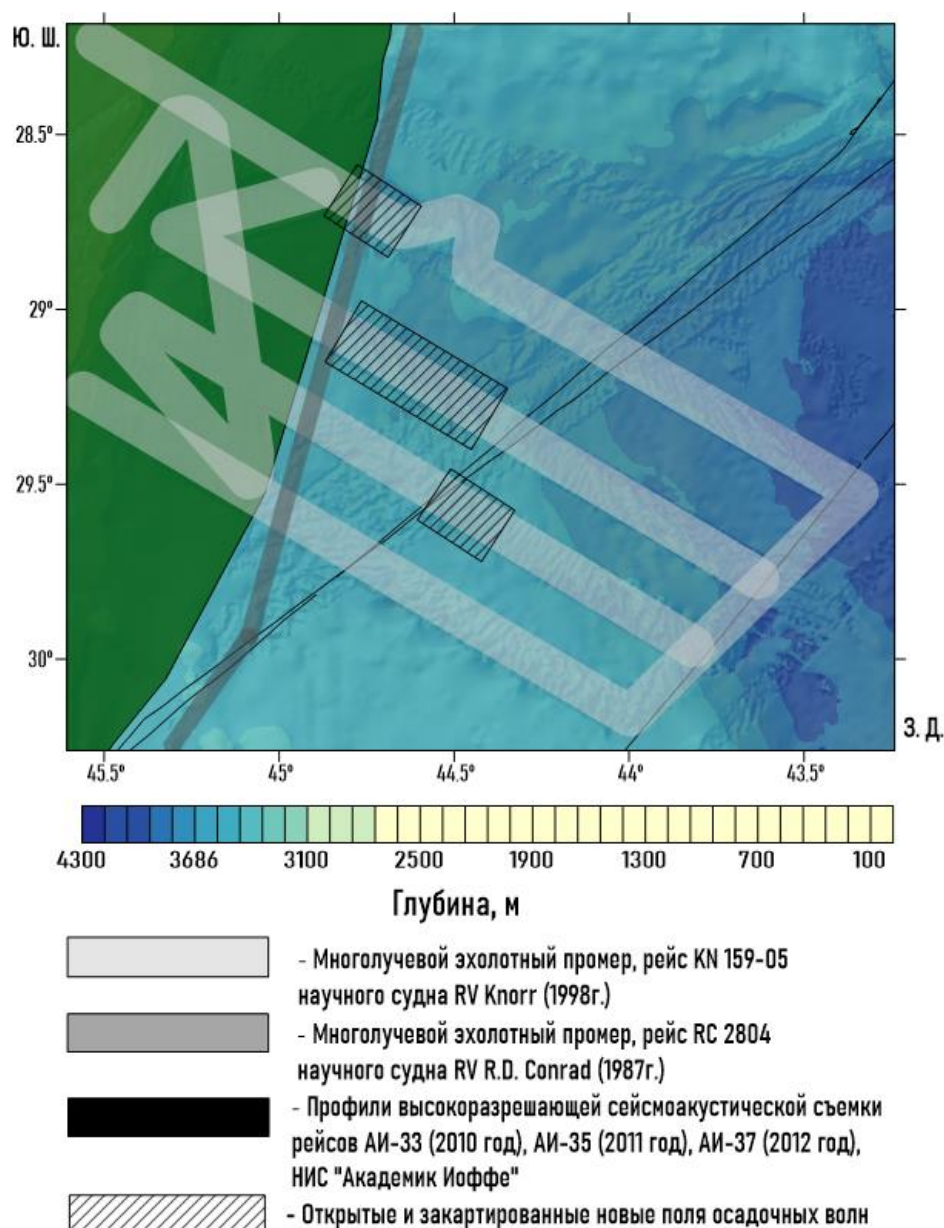


рис. 1. схема расположения профилей многолучевого эхолотирования и сейсмоакустической съемки в районе исследования.

Морфология дна и акустическая структура донных отложений.

Анализ батиметрических данных позволил оконтурить область распространения осадочных волн в северной части плато Санта Катарина. Эта область имеет размеры 200 на 110 километров (21852 км²) и располагается между 28°32'49" ю.ш., 30°17'10" ю.ш., 29°0'43" з.д., 29°53'20" з.д. Оценка размеров области распространения осадочных волн отличается от оценки, приведенной в статье Bogisov et al. (2020), так как в данной работе рассматривался только район, покрытый съемкой многолучевым эхолотом, к северу от поднятия Торрес. Благодаря многоэтапной обработке сырых данных многолучевого эхолотирования, были закартированы осадочные волны, о существовании которых ранее не было известно. Высота осадочных волн в пределах поля меняется от 5.2 метров до 91 метра, составляя в среднем 32.4 метра (медианное значение – 29.7 метров, среднеквадратичное отклонение – 12.7 метров). Расстояние между гребнями варьирует в пределах 1070 – 6739 метров, и имеет среднее значение 2750 метров (медианное значение – 2585 метров, среднеквадратичное отклонение – 841 метров). Эти два параметра хорошо коррелируют друг с другом, коэффициент корреляции Пирсона $r = 0.61$ (рис. 2).

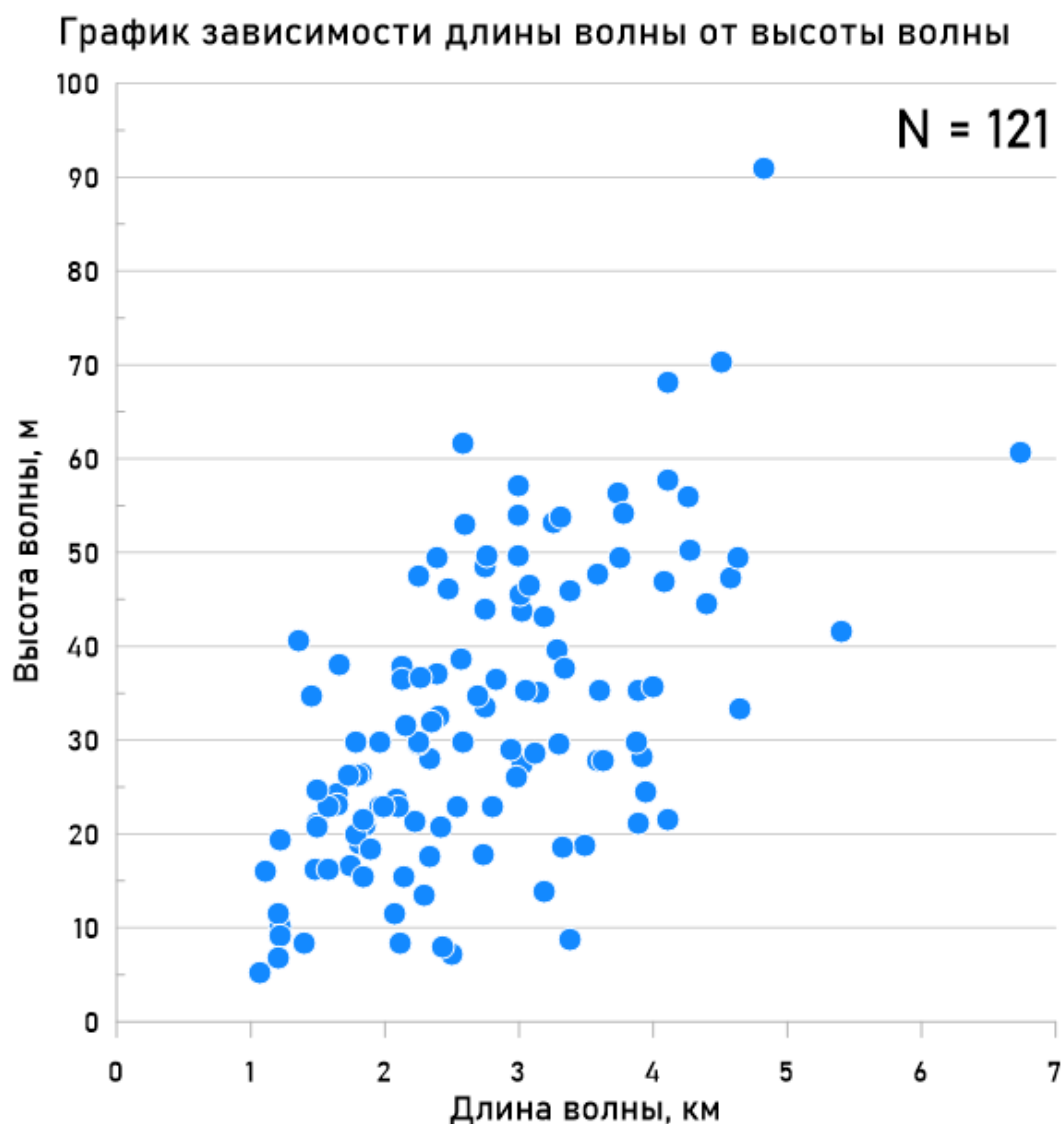


рис. 2. график зависимости высоты осадочных волн на плато Санта Катарина от их длины.

Такие осадочные волны являются довольно крупными для глубоководных районов океана. Некоторые из них можно даже назвать гигантскими. Рассмотренные осадочные волны очень нерегулярны в своих параметрах, демонстрируют то симметричный (в большинстве случаев), то слегка ассиметричный профиль. Размеры соседних волн могут значительно отличаться. Однако отмечено укрупнение волн в направлении с северо-запада на юго-восток. Гребни осадочных волн достигают 18 километров по протяженности и ориентированы в большинстве случаев под углом $125\text{--}165^\circ$ от направления на север (рис. 3). Гребни волн субпараллельны друг другу на северо-западе поля, а на юго-востоке, ближе к склону поднятия Торрес, обнаруживается слияние и раздвоение гребней соседних волн.

Численное моделирование скоростей и направлений придонных течений (INMOM) показало выраженное антициклоническое движение потока НЦПВ на плато (Borisov et al., 2020; Frey et al., 2022). Встречая на своем пути топографическое препятствие в виде поднятия Торрес, поток НЦПВ вынужденно поворачивает на восток и движется вдоль склонов поднятия. При этом скорость течения значительно увеличивается.

Распределение азимутов простираения хребтов осадочных волн

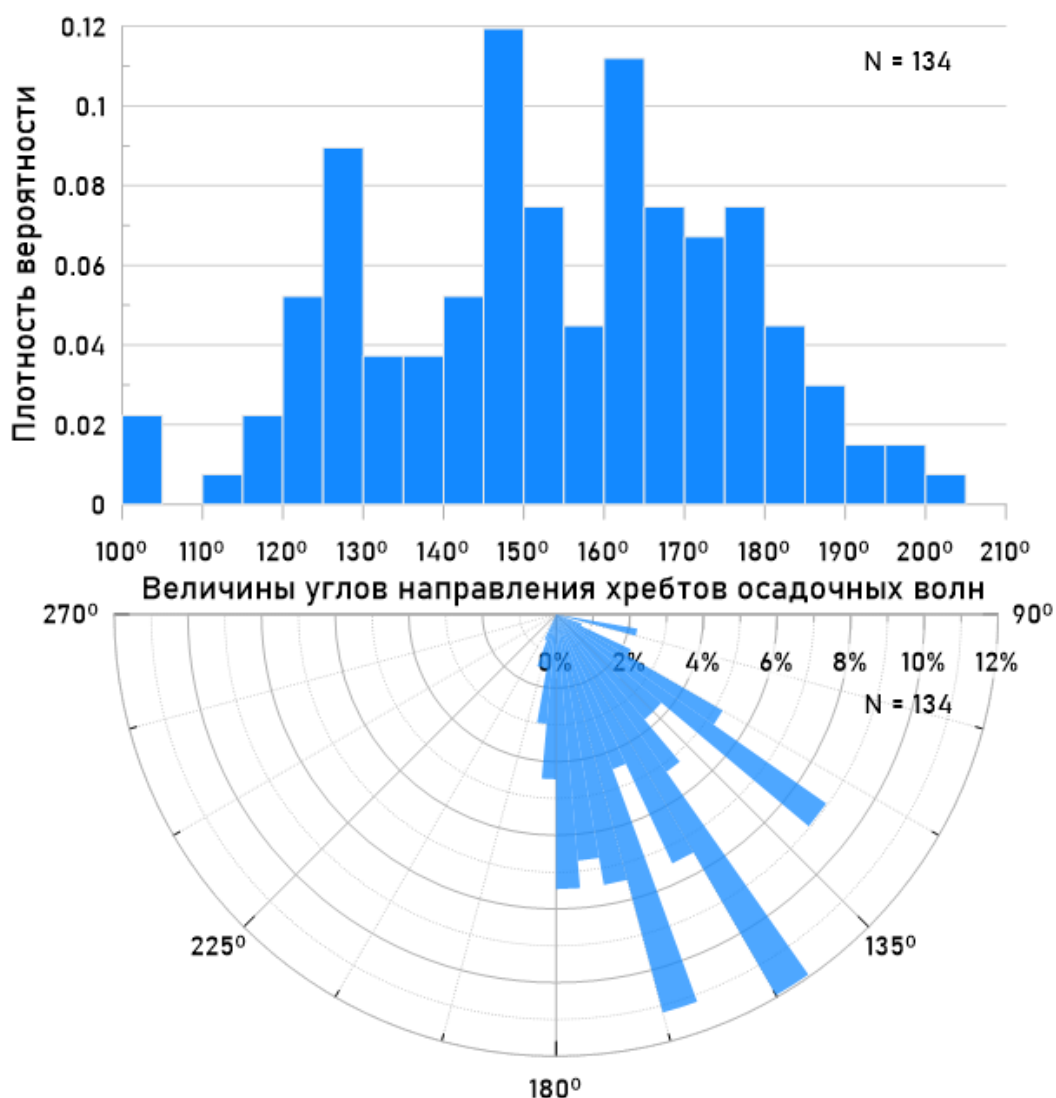


рис. 3. пространственное распределение азимутов простираения хребтов осадочных волн в исследуемом районе.

Сопоставление распределения размеров осадочных волн с результатами моделирования скоростей придонных течений показывает хорошую положительную корреляцию между этими параметрами (рис. 5). Иными словами, чем выше скорость течения на том или ином участке плато, тем выше волны и больше расстояния между их гребнями. Взаимодействие потока НЦПВ со склонами поднятия Торрес, вероятно, приводит к формированию локальных турбулентных вихрей, что в сумме с высокой скоростью течения и порождает гигантские волны, гребни которых имеют извилистую форму, раздваиваются и сливаются с соседними осадочными волнами. Симметричная форма осадочных волн, как предполагают Borisov et al. (2020), Frey et al. (2022) может быть связана с высокой степенью изменчивости направлений придонных течений, даже в течение года. В результате такой изменчивости отложение осадочного материала происходит равномерно на обоих склонах волны.

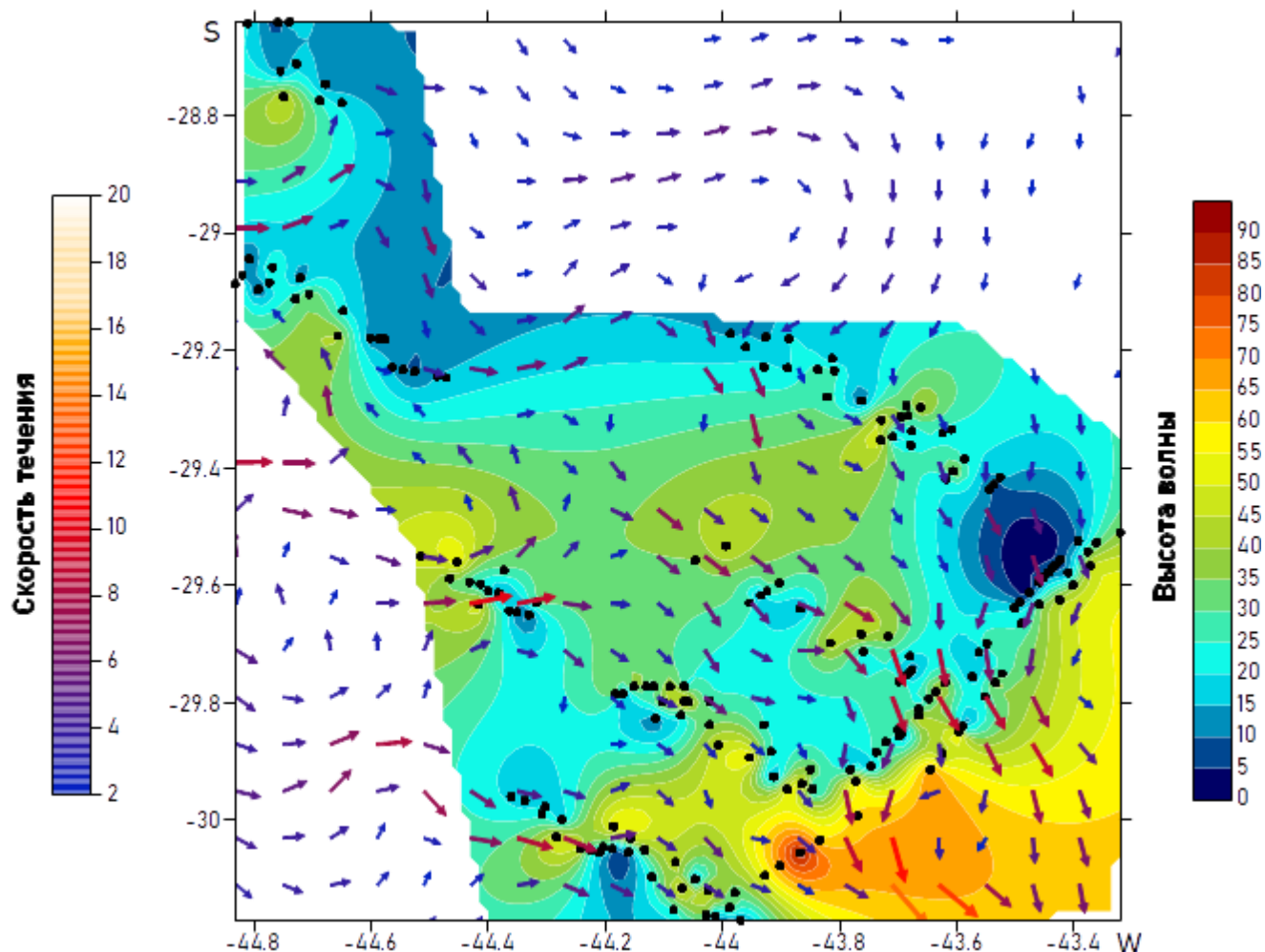


рис. 5. сопоставление распределения высот осадочных волн с результатами моделирования скоростей и направлений придонных течений (модель INMOM).

Расположение волн на довольно пологой поверхности крупного плато Санта-Катарина, выраженная корреляция размеров волн со значениями скорости течения НЦПВ, преимущественная ориентация осадочных волн под углом к направлению течения, характерная акустическая структура волн, описанная выше, указывает на контуритовую природу данных аккумулятивных тел.

Если на основании пространственной ориентации волн попытаться реконструировать возможные направления потоков, которые могли сформировать рассматриваемые осадочные волны, то доминирующие направления потоков условно разделятся на две группы: западная

(зеленые стрелки) и восточная группы (оранжевые стрелки), показанные на рис. 6. Эти две группы направлений (стрелок), отличаются тем, что восточная группа в целом хорошо совпадает с генеральным направлением придонного течения НЦПВ, а западная – не совпадает. Такое различие может быть объяснено изначальными неровностями дна, которые послужили субстратом для формирования поля осадочных волн. Предположительно, такие неровности могли возникнуть в результате активности гравитационных потоков, движущихся с континентального склона на плато в направлении, совпадающем с западной группой стрелок. Имеющиеся в распоряжении автора данные сейсмоакустического профилирования имеют недостаточную глубину проникновения в осадки, чтобы подтвердить или опровергнуть данную гипотезу. Вторым возможным (и более вероятным на взгляд автора) объяснением может быть эрозионная деятельность течения НЦПВ, которая привела к образованию вытянутых по направлению течения промоин. Эти промоины в свою очередь послужили субстратом для образования осадочных волн в западной части поля. Такие промоины были обнаружены Jeck et al. (2019) совсем неподалеку, к западу от поля осадочных волн, у подножия континентального склона. Рост поля, накопление осадков могли замаскировать изначальные эрозионные формы рельефа, а осадочные волны, возникшие в результате работы течения НЦПВ получили текущую ориентировку в пространстве.

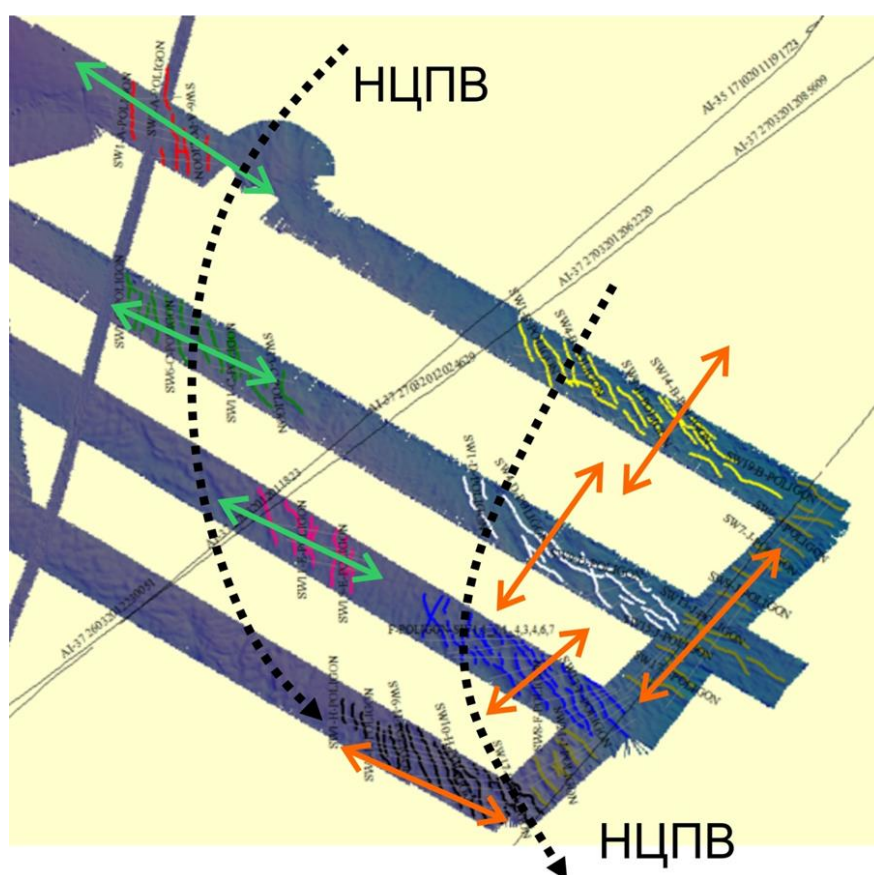


рис. 6. реконструкция предполагаемых направлений потоков/течений, ответственных за формирование осадочных волн на плато Санта-Катарина (на основе пространственной ориентации гребней волн). Зеленые стрелки не совпадают с направлением придонного течения (пунктирные линии), а оранжевые стрелки совпадают.

Выводы

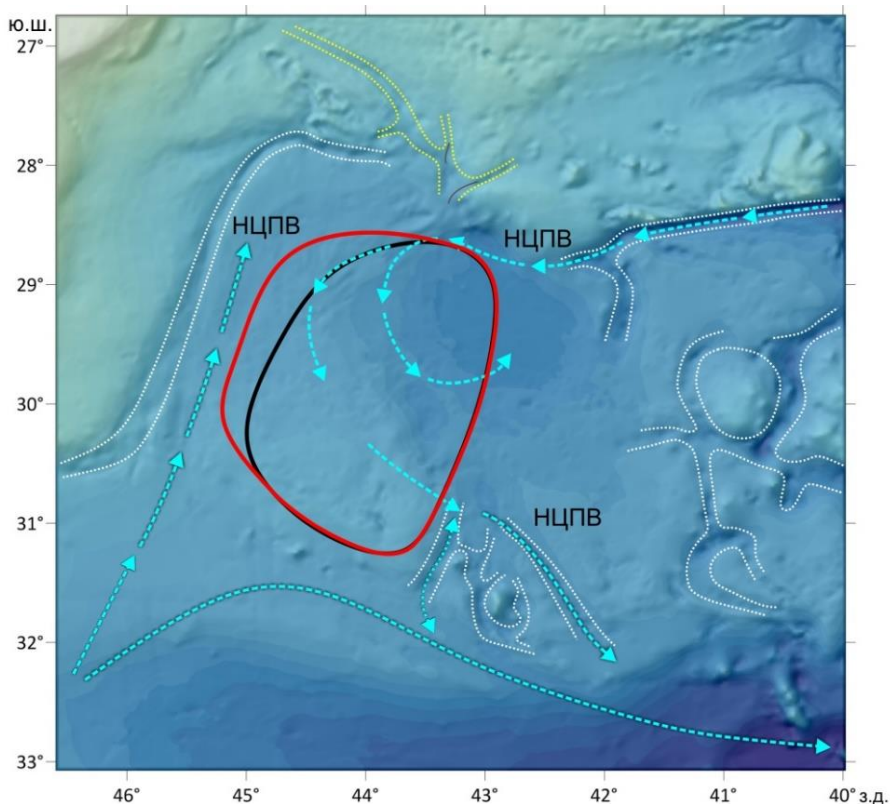
Плато Санта-Катарина является уникальной природной лабораторией для исследования контуритов. Его покрывают несколько крупных дрейфов и обширное поле осадочных волн. Несмотря на актуальность темы влияния придонных течений на осадконакопление и

уникальность данного региона, вопросы о сейсмической структуре контуритовых тел, их морфологии и механизмах образования остаются мало изученными.

Детальная обработка и анализ данных многолучевого эхолотирования, использованных в данной работе, позволили уточнить границы поля осадочных волн на плато Санта-Катарина. Поле оказалось более обширным, чем считалось ранее (рис. 7). Впервые для данного региона была детально исследована морфология осадочных волн в сопоставлении с данными моделирования скоростей придонных течений.

На сейсмоакустических профилях сверхвысокого разрешения донные отложения в области распространения осадочных волн характеризуются четкой акустической стратификацией. Параллельные и субпараллельные, преимущественно прерывистые ундулирующие отражающие границы (рефлекторы) характеризуются низкой и умеренной амплитудой отраженного сигнала. Глубина проникновения акустического сигнала ниже поверхности дна достигает 60 метров. Признаков миграции вершин осадочных волн на сейсмоакустических разрезах не обнаружено (рис. 3.8, рис. 3.9). В соответствии с существующими классификациями акустических образов отложений выявленные сейсмofации можно отнести к типу ШВ по Damuth, Hayes (1977).

На основании морфологии, акустической структуры, пространственной ориентации и расположения относительно направления придонных течений, сделаны выводы о контуритовой природе осадочных волн на плато. Течение Нижней циркумполярной воды предположительно является ответственным за формирование осадочных волн. Ориентировка осадочных волн в районе исследования во многом определяется рельефом дна. Вероятно, субстратом для формирования части осадочных волн рассматриваемого поля послужили неровности дна, образованные деятельностью гравитационных потоков с континентального склона либо, либо промоины, сформировавшиеся под действием придонного течения НЦПВ.



- границы поля осадочных волн по Borisov et al., 2020
- уточненные границы поля осадочных (данная работа)

рис. 7. распространение осадочных волн в районе исследования и направления придонного течения НЦПВ.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке РФФ (проект № 22-27-00421).

Список литературы:

1. Damuth J. E., Hayes D. E. Echo character of the east Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes //Marine Geology. – 1977. – Т. 24. – №. 2. – С. 73-95.
2. Borisov D., Frey D., Levchenko O. Sediment waves on the Santa Catarina plateau (western south Atlantic) //Journal of South American Earth Sciences. – 2020. – Т. 102. – С. 102698.
3. Frey D. et al. Modeling of bottom currents for estimating their erosional-depositional potential in the Southwest Atlantic //Journal of Marine Systems. – 2022. – Т. 230. – С. 103736.
4. Jeck I. K. et al. The Santa Catarina Plateau and the nature of its basement //Geo-Marine Letters. – 2020. – Т. 40. – №. 6. – С. 853-864.
5. Morozov E. G. et al. Abyssal channels in the Atlantic Ocean: Water structure and flows. – Springer Science & Business Media, 2010.

УДК 551.553.9

Рубрика 44.38.70

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОГЕОХИМИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

REGIONAL STUDIES OF HYDROCARBON GAS FIELDS

Александрова Алина Георгиевна¹, Семенов Петр Борисович², Александрова Дана Вадимовна³

¹*ИО РАН*

²*ФГБУ "ВНИИОкеангеология"*

³*Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина*

Aleksandrova Alina Georgievna¹, Semenov Pyotr Borisovich², Aleksandrova Dana Vadimovna³

¹*Shirshov IO RAS, Moscow*

²*FSBI "VNIIOkeangeologia"*

³*Gubkin National University of Oil and Gas*

Ключевые слова: газоносность, осадочный бассейн, донные осадки, геологические факторы, геохимические признаки, нефтегазоносность, Баренцевоморский шельф.

Введение

В данной работе на примере газогеохимических исследований на континентальном шельфе Баренцева и Печорского морей в пределах исследованных площадей показано соотношение региональных закономерностей распределения углеводородных газов (УВГ), установлена газонасыщенность донных осадков. По условиям образования УВГ под разделяются на сингенетические и эпигенетические газы. К сингенетическим относятся УВГ, образовавшиеся в донных осадках в результате различных биохимических реакций и бактериальной деятельности в процессе деструкции органического вещества (ОВ). К эпигенетическим – поступающие в донные осадки из подстилающих углегазоносных, нефтегазоносных осадочных отложений и магматических образований в результате процессов диффузии и миграции УВГ по зонам разломов [1]. Для понимания процессов консервации и выбросов метана при проведении площадной газогеохимической съемки наибольший интерес представляет выявление эпигенетической составляющей. С циклом метана связана одна из наиболее важных фундаментальных проблем - проблема глобальных климатических изменений, которую невозможно решить без количественных оценок потока CH₄ в атмосферу не только с суши, но и из океана. В общем потоке метана с поверхности Земли только 2% поступает из океана: больше 40% выделяется из переувлажненных почв; 22,5% связано с жизнедеятельностью животных и термитов; около 33% имеет антропогенное происхождение. Данная величина потока метана из океана в атмосферу определена по разности концентраций

метана в приповерхностных водах океана и в придонном слое, и по разным оценкам колеблется от 4 до 71 млн т в год [2, 3] и нуждается в уточнении.

По результатам геохимической углеводородной гидрогазосъёмки методом непрерывного профилирования были проведены аналитические измерения по содержанию газовой компоненты из дегазированной придонной воды и в газовой фазе донных осадков в Баренцевом море на Кольском шельфе, а также в пределах Долгинского лицензионного участка в Печорском море. В пределах анализируемых сводных выборок по содержанию метана выделены совокупности и установлены закономерности распределения полей их концентрации в обстановках указанных участков, благодаря чему представляется возможным дальнейшее практическое использования газовой составляющей как критерия для поиска и прогноза нефтегазовых залежей.

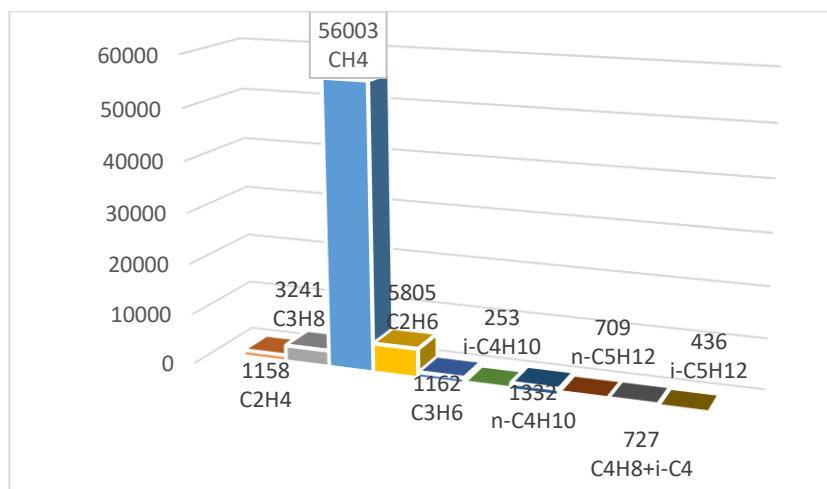
Материалы и методы

Пробоотбор донных осадков боксорером (25 проб) и STD- зондирование водной толщи с отбором проб воды из придонно-пограничного слоя водной толщи было проведено в Печорском море в октябре 2016 г. в пределах Долгинского нефтяного месторождения. Долгинское нефтяное месторождение расположено в центральной части Печорского моря в 120 км к югу от архипелага Новая Земля и в 110 км к северу от материкового берега, глубина моря в этом районе составляет 35-55 метров. В период экспедиции в 2005 г были выполнены следующие виды работ в пределах лицензионных участков «Кольский-1», «Кольский-2», «Кольский-3»: опробование придонной воды, включающее: отбор проб воды для выделения газовой компоненты; геологическое опробование донных отложений с целью выделения газовой компоненты в донных осадках. В связи с сильным волнением (как правило опробование проводилось при 3-4 – х баллах) опробование проводилось с использованием дночерпателя с площадью захвата 0,1 м² и проникновением в грунт на 40 см и 3-х метровой гравитационной трубкой, а также боксорером. Максимальная мощность донных осадков, отобранных гравитационной трубкой составляла 2 м 10 см. Отбор проб из гравитационной трубки проводился по схеме описанной для отбора проб на газовую геохимию. Опробование придонной воды при комплексных гидрогеохимических исследованиях проводилось на каждой геологической станции 5-тилитровым батометром выполненным из инертного материала. Из батометра отбирались пробы воды для дегазации, объем которой составлял 1 литр. Проба воды герметически закрывалась и выдерживалась до комнатной температуры, после чего проводилась ее дегазация. Дегазация донных осадков и проб воды проводилась на дегазационной установке. Аналитические измерения по содержанию газовой компоненты из дегазированных проб донных осадков и придонной воды проводился на хроматографе «Цвет-100». Средние значения метана и его гомологов приведены в объемных процентах x 10⁴ (ppm) и в абсолютных содержаниях – в см³ на кг осадка.

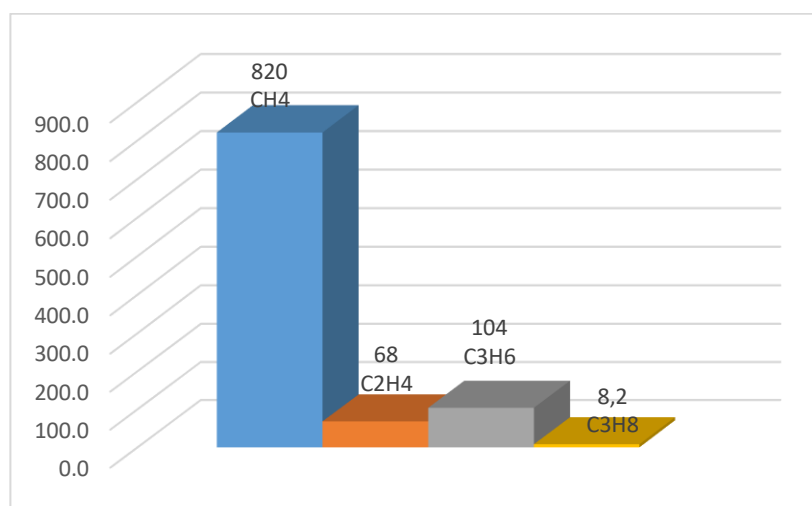
Лицензионные участки «Кольский-1», «Кольский-2», «Кольский-3» расположены в основном в пределах северного склона Кольского (Нордкапского) желоба. Северный склон и прилегающая к нему часть днища Кольского желоба являются основными региональными геоморфологическими элементами, которые определяют геоэкологические и инженерно-геологические условия на данных полигонах.

Результаты и обсуждение

В составе газа воды придонно-пограничного слоя и донных осадков исследованных площадей установлены: углеводородные газы (CH_4 , и его предельные и непредельные гомологи) (рис. 1).



(а)



(б)

Рис. 1. Газонасыщенность донных осадков, нл/кг. (а) Печорское море; б) Кольско-Канинская моноклиналь.

Были получены статистические параметры распределения содержаний метана, предельных и непредельных углеводородов в газовой фазе донных осадков и придонной воде по изучаемым морским участкам, была проведена оценка значимости значений t - критерия Стьюдента при сравнении средних содержаний метана его гомологов в газовой фазе в придонно-пограничном слое водной толщи в газовой фазе донных осадков в выделяемых совокупностях. При анализе изменения средних содержаний метана и суммы его гомологов в газовой фазе донных осадков на Кольско-Канинской моноклинали в пределах анализируемой сводной выборки выделяются восемь совокупностей. При этом, сопоставление указывает на существенное влияние сингенетического (биогенного) накопления метана, что практически проявляется в отсутствии коррелированности средних значений метана и суммы гомологов метана. Исключение составляют выборки 3 и 8, в которых отмечается резкое возрастание метана и суммы гомологов, что отражает эпигенетическую составляющую в накоплении метана и суммы гомологов, может свидетельствовать о возможном наличии скоплений углеводородов нефтяного типа в разрезе осадочного чехла. Наиболее отчетливо это проявляется при рассмотрении коррелированности содержаний метана и суммы его гомологов, а также

рассчитанными коэффициентами корреляции, что свидетельствует о едином источнике их поступления и, как следствие, наличия скоплений залежей УВ в разрезе осадочного чехла. Исключение также составляет выборка 7, в которой существенно проявляется поступление метана за счет разложение ОВ, что отражено в отрицательном значении коэффициента корреляции метана и суммы его гомологов (рис. 2).

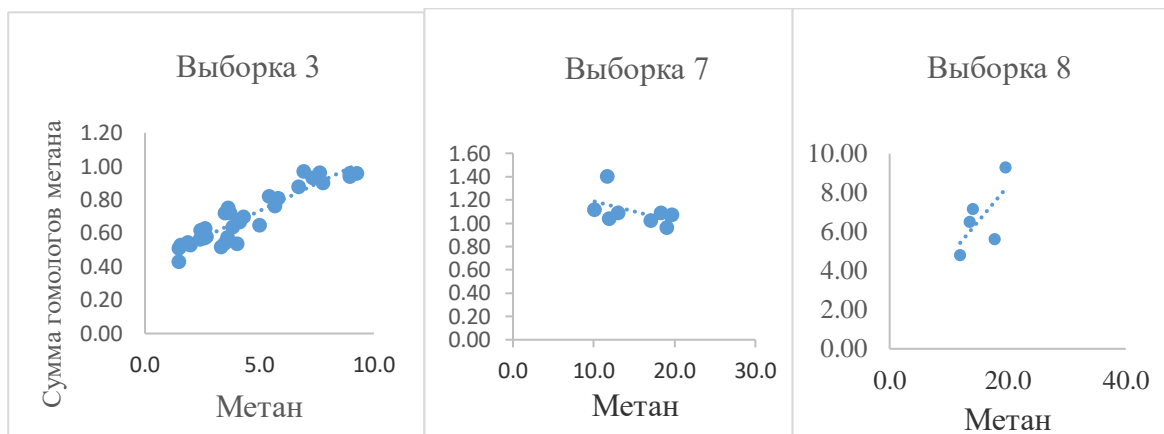


Рис. 2. Соотношение содержания метана и суммы его гомологов в газовой фазе донных осадков в анализируемых сводных выборках.

Заключение

Сравнительный анализ содержания метана и суммы гомологов в пределах анализируемых сводных выборок в газовой фазе из придонно-пограничного слоя водной толщи Кольско-Канинской моноклинали и в пределах анализируемых сводных выборок придонно-пограничного слоя водной толщи и в газовой фазе донных осадков в Печорском море показывает, что различия по содержанию метана, предельных и непредельных УВ являются статистически значимыми. Наиболее ясно коррелированность содержаний метана и предельных УВ, метана и непредельных УВ, предельных и непредельных УВ выражена рассчитанными коэффициентами корреляции, что свидетельствует о едином процессе поступления, унаследованности основных свойств газовой компоненты донных осадков, и как следствие, является источником скоплений углеводородов нефтяного типа в разрезе осадочного чехла.

Список литературы

1. Гресов А.И., Обжиров А.И., Яцук А.В., Мазуров А.К., Рубан А.С. Газоносность донных осадков и геохимические признаки нефтегазоносности шельфа Восточно-Сибирского моря. Тихоокеанская геология, 2017, том 36, № 4, с. 77-84.
2. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. Ин-т микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. М.: Наука. 2009. С. 576.
3. Cicerone R.Y., Oremland R.S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane//Glob.Biogeochem.Cycles. 1988. № 2. P. 299-327.

УДК 551.242.23

Рубрика 38.17.27

ЭВОЛЮЦИЯ ТРАНСФОРМНОГО РАЗЛОМА ЭНДРЮ-БЕЙН (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

ANDREW BAIN TRANSFORM FAULT EVOLUTION (BASING ON PHYSICAL MODELLING)

Боголюбский Вячеслав Андреевич^{1,2}, **Дубинин Евгений Павлович**^{1,2}, **Грохольский Андрей Львович**²

¹ *Геологический факультет, МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва*

² *Музей Землеведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва*

Bogoliubskii Viacheslav Andreevich^{1,2}, **Dubinini Evgeniy Pavlovich**^{1,2}, **Grokholsky Andrey Lvovich**²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University, The Earth Sciences Museum, Moscow*

Система трансформных разломов (ТР) Дю Туа – Эндрю-Бейн – Принс Эдуард разделяет две части Юго-Западно-Индийского спредингового хребта, различные по своему тектоническому строению и эволюции, таким образом, являясь одним из немногих примеров систем демаркационных разломов. Хребет и трансформные разломы развиваются в условиях ультрамедленного спрединга со скоростями растяжения не более 16 мм/год. Среди этих разломов выделяется ТР Эндрю-Бейн, обладающий наиболее сложной внутренней структурой. Общее смещение спрединговых хребтов по системе трансформных разломов составляет 1230 км (Пейве и др., 2007). Данная система трансформных разломов заложилась ещё при расколе Гондваны в период 153,7-157 млн лет назад при начале спрединга в пределах Мозамбикского бассейна (Thompson et al., 2019). Скорости спрединга на протяжении развития хребта не были постоянны и варьировались от 66,2 мм/год (>76 млн лет назад) до 14,2 мм/год (~10 млн лет назад) (Yu et al., 2020).

В ходе своего развития система трансформных разломов претерпела несколько кинематических перестроек, оказавших значительное влияние на её морфологию. Первое подобное событие относится к периоду от >84 млн лет назад, когда изменение направления растяжения с северного на северо-восточное, вероятно, привело к началу формирования полиразломной системы. Следующим значимым событием стало изменение направления растяжения на 90° в районе 69 млн лет, однако, уже 56-52 млн лет назад направление растяжения вновь сменилось на северо-восточное. В рельефе эти два события прослеживаются в виде сигмовидных в плане пассивных следов системы трансформных разломов. Вероятнее всего, начиная с 69 млн лет произошло резкое увеличение количества плоскостей сдвига, что и было зафиксировано в рельефе (Sclater et al., 2005; Пейве, 2009).

Последние значительные изменения фиксируются около 20 млн лет с небольшим изменением направления растяжения (не более 10°), что, предположительно, привело к формированию сложного структурного плана, наблюдаемого в пределах ТР Эндрю-Бейн. Он включает в себя

несколько параллельных трансформных долин, разделяемых межразломными хребтами, ряд бассейнов пулл-эпарт и систему косых впадин и хребтов. Имеющиеся в настоящее время гипотезы в основном представляют развитие данного структурного плана как результат постепенного изменения простирания внутритрансформного спредингового сегмента от субортогонального к направлению растяжения до транстенсивного (25-35°) (Sclater et al., 2005; Пейве, 2009).

Для воспроизведения условий эволюции ТР Эндрю-Бейн на разных этапах развития была использована методика физического моделирования, проводившееся на базе лаборатории Музея Землеведения МГУ имени М. В. Ломоносова. Экспериментальная установка включает текстолитовую ванну, поршень, растягивающий модельное вещество, и систему внутреннего нагрева. Модельное вещество представляет собой смесь парафина, вазелина и церезина. Его свойства удовлетворяют критерию подобия океанической литосферы, включающему в себя плотность материала, его толщину и предел прочности на сдвиг (Шеменда, 1983).

После плавления вещества в установке его верхний слой охлаждается вентилятором и по достижении необходимой толщины корки застывшего вещества (модельной литосферы) начинается её растяжение с помощью поршня. Вещество обладает упруго-вязко-пластичными свойствами и при определённых значениях температуры и скорости растяжения ведёт себя как хрупкое или пластичное тело. Деформации модельной литосферы определяются толщиной хрупкого слоя H и шириной ослабленной зоны W (Грохольский, Дубинин, 2010). Также в модель можно ввести локальный источник нагрева, имитирующий термическую активность мантийного плюма. В рамках моделирования ТР Эндрю-Бейн были использованы также новые методики визуализации результатов физического моделирования, включающие построение цифровой модели рельефа эксперимента и фиксацию температурного поля эксперимента с помощью тепловизора InfiRay T3S.

В ходе моделирования было осуществлено три серии экспериментов. Первая серия экспериментов включала в себя систему ортогональных друг к другу разрезов, имитирующую политрансформную систему, наклонённую под углом 45° по отношению к направлению растяжения, что соответствует резкому изменению направления растяжения около 69 млн лет. В ходе растяжения система трансформных разломов длительное время сохраняла свою изначальную конфигурацию, но затем в краевых частях прилегающих сегментов уже существовавшие нетрансформные смещения начали постепенно увеличивать свой оффсет. Таким образом, к концу эксперимента суммарное смещение осей спрединга по политрансформной системе возросло практически на 30%, а общее количество сдвиговых плоскостей увеличилось с трёх до пяти. При этом, существовавшие трансформные разломы в ходе растяжения также изменяли значения своего оффсета в ходе локальных перескоков оси спрединга. Подобная ситуация также наблюдается в пределах современной системы трансформных разломов: на флангах межразломных спрединговых сегментов по данным многолучевой батиметрии отчётливо прослеживается ряд отмерших рифтовых долин, имеющих возраст не более 20 млн лет, что также позволяет связать их происхождение с вышеописанными изменениями кинематики трансформной системы.

Вторая серия экспериментов имела аналогичную первой конфигурацию, однако, вся система СОХ-ТР была повернута относительно направления растяжения на 30° таким образом, чтобы по системе трансформных разломов реализовывалась транспрессия. В результате растяжения изначальное существовавшие межразломные спрединговые сегменты постепенно изменяли свою ориентировку, переходя ко всё более косому растяжению, а их форма в плане представляла собой ромбовидные впадины, соединённые между собой слегка наклонными (<15°) к направлению растяжения сдвиговыми зонами. На конечной стадии эксперимента все три сдвиговые зоны объединились в единую протяжённую сдвиговую зону. В краевых частях трансформная зона постепенно изменяла своё простирание, переходя в прилегающие спрединговые сегменты. Данная экспериментальная серия соответствует эволюционной

стадии 56-52 млн лет назад, когда в течение короткого промежутка времени количество звеньев политрансформной системы уменьшилось при изменении направления растяжения. Таким образом, сам процесс перестройки системы трансформных разломов сопровождался активными деформациями существовавших спрединговых сегментов, что могло привести к формированию именно на этом этапе широкой области деформаций, а, возможно, и линзовидной формы ТР Эндрю-Бейн.

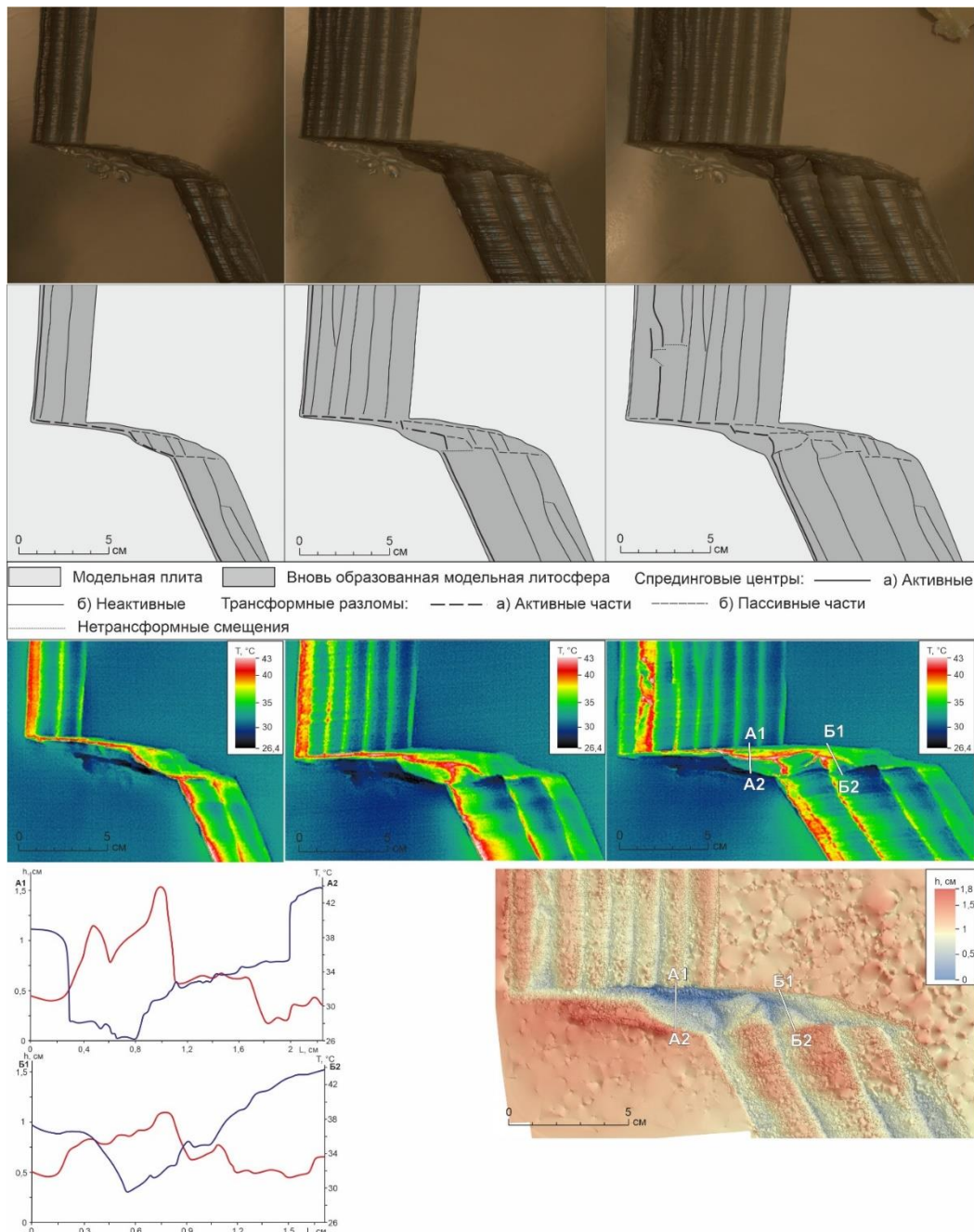


Рис. 1. Эксперимент 2736. Моделирование современной структуры трансформного разлома Эндрю-Бейн. Сверху вниз: фотографии экспериментов, их интерпретация, данные температурного поля, рельеф экспериментальной модели, температурные и гипсометрические профили по линиям

Заключительная серия экспериментов (рис. 1) имела целью реконструкцию условий формирования современной структуры ТР Эндрю-Бейн, формирующейся, предположительно, начиная с 20 млн лет. В изначальной конфигурации задавалось два спрединговых сегмента (разреза), располагающихся под углами 10° и 25° к направлению растяжения, соединённых косым (80°) разрезом линзовидной формы. Результатом данной экспериментальной серии стало образование сложной структуры, включающей в себя две сдвиговые зоны, соединённые ортогональным межразломным сегментом, и системы перекрывающихся сегментов разной степени наклона при взаимодействии которых формируются вращающиеся блоки поднятий. Данный структурный план хорошо согласуется с вышеописанной структурой ТР Эндрю-Бейн и позволяет внести некоторые дополнения в имеющиеся эволюционные схемы трансформного разлома. Так, что внутритрансформный косой центр растяжения несколько раз совершал перескок в северном направлении, реактивизируя участки более древней трансформной долины, а ортогональный центр спрединга постепенно изменял своё простирание, приобретая значительную сдвиговую компоненту и формируя бассейн пулл-эпарт, на протяжении длительного времени существуя параллельно вместе с косым спрединговым сегментом

Таким образом, при кинематических перестройках 69 млн лет назад, увеличение количества сдвиговых плоскостей политрансформной системы, вероятнее всего, происходило, не постепенно, а через серию перескоков оси спрединга. При последующем изменении направления растяжения 56-52 млн лет, спрединговые сегменты, наоборот, сохраняли своё пространственное положение и постепенно изменяли своё простирание, что могло привести к формированию широкой зоны деформаций и линзовидной в плане формы ТР Эндрю-Бейн. Впоследствии, именно эти условия явились ключевыми для формирования современной структуры ТР Эндрю-Бейн после изменения направления растяжения 20 млн лет назад.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 22-27-00110.

Список литературы:

1. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Структурообразование в рифтовых зонах и поперечных смещениях осей спрединга по результатам физического моделирования // Физика Земли. – 2010. – № 5. – С. 49–55.
2. Пейве А.А. Аккреция океанической коры в условиях косого спрединга // Геотектоника. – 2009. – № 2. – С. 5-19
3. Пейве А.А., Сколотнев С.Г., Лиджи М. и др. Исследования зоны трансформного разлома Эндрю-Бейн (Африкано-Антарктический регион) // Доклады АН. – 2007. – Т. 416, №1. – С. 77-80.
4. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. – 1983. – № 10. – С. 10–19.
5. Sclater J.G., Grindlay N.R., Madsen J.A., Rommevaux-Jestin C. Tectonic interpretation of the Andrew Bain transform fault: Southwest Indian Ocean // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2005. – Vol. 6. – Q09K10
6. Thompson J.O., Moulin M., Aslanian D., de Clarens P., Guillocheau F. New starting point for the Indian Ocean: Second phase of breakup for Gondwana // *Earth-Science Reviews.* – 2019. – Vol. 191. – P. 26–56.

7. Yu X., Dick H., Li X.H., You C.F., Hui D.Y., Hang H. The geotectonic features of the Southwest Indian Ridge and its geodynamic implications // Chinese Journal of Geophysics. – 2020. – Vol. 63, No. 10. – P. 3585-3603.

УДК 550.4

Рубрика 38.33.00

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

FEATURES OF THE DISTRIBUTION OF NATURAL GASES IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF THE ADJACENT WATERS OF THE SOUTHERN PART OF THE KAMCHATKA PENINSULA

Малицкий Сергей Игоревич¹, Яцук Андрей Вадимович^{2,3}, Бовсун Мария Александровна^{2,3}, Швалов Дмитрий Александрович², Корнеева Анна Олеговна⁵, Новиков Олег Сергеевич⁴, Медведева Александра Алексеевна⁵

¹ ДВФУ, Владивосток

² ТОИ ДВО РАН им. В. И. Ильичева, Владивосток

³ Far Eastern Climate Smart Lab, Владивосток

⁴ ДГТУ, Ростов-на-Дону

⁵ БФУ им. И. Канта, Калининград

Malitskii Sergei Igorevich¹, Yatsuk Andrey Vadimovich^{2,3}, Bovsun Maria Alexandrovna^{2,3}, Shvalov Dmitry Alexandrovich², Korneeva Anna Olegovna⁵, Novikov Oleg Sergeevich⁴, Medvedeva Alexandra Alexeevna⁵

¹ FEFU, Vladivostok

² Il'ichev POI FEB RAS, Vladivostok

³ Far Eastern Climate Smart Lab, Vladivostok

⁴ DSTU, Rostov-on-Don

⁵ Immanuel Kant BFU, Kaliningrad

Введение

Повышенные показатели содержания метана (CH₄) в донных отложениях могут свидетельствовать о поступлении термогенных (эпигенетических) газов и наличии зон фокусированной разгрузки, которые говорят о высоком потенциале определенного района с точки зрения нефтегазоносности. Однако высокие концентрации метана не всегда обусловлены подтоком из глубин осадочного чехла. Так, деструкция органических веществ, антропогенный или другие факторы могут быть причинами высокой концентрации метана на разных горизонтах осадков. Для того, чтобы наиболее точно установить причину аномалий метана в определенном районе необходимо обращать внимание на его фоновое региональное содержание и концентрацию его гомологов (этан, пропан, бутаны, этилен, пропилен). Этан и

пропан как правило, имеют термогенное происхождение. В отличие от них присутствие этилена и пропилена обусловлено в основном биохимическим и микробиальным процессам, сопутствующим процессам деструкции органических веществ.

В данном исследовании приведен пространственный анализ распределения концентраций метана в донных отложениях прибрежных акваторий южной части полуострова Камчатка – Авачинской губы (3 станции), Охотского моря (44 станции), а также северо-западной части Тихого океана (46 станций). Данные собраны отрядом морской геологии и лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН в ходе рейса №23/4 НИС «Профессор Мультиановский» (август-сентябрь 2023 г.) в рамках программы «Плавучий университет» (рис. 1). Всего в ходе экспедиции было отобрано и проанализировано 168 проб.

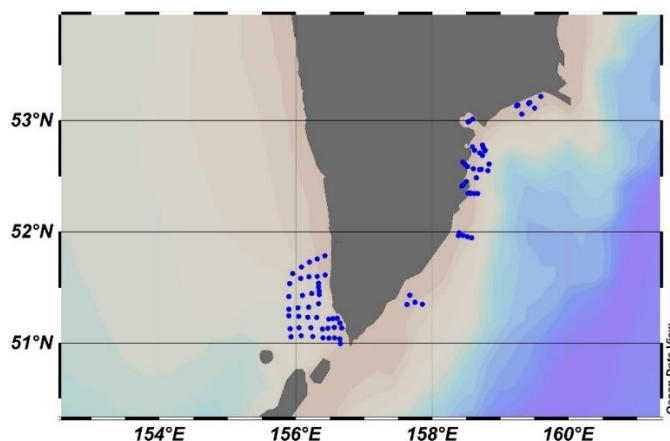


Рис. 1 – Карта района исследования с распределением станций отбора проб.

Целью исследования является исследование особенностей пространственного распределения метана и природных газов в донных отложениях прибрежных акваторий юга полуострова Камчатка.

Для решения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Произвести отбор и анализ проб осадка методом «Head Space».
2. Изучить пространственные закономерности распределения метана и других природных газов в осадках исследуемых акваторий и установить районы с аномальными концентрациями.

Для проведения исследований использовалось следующее оборудование:

- Отбор донных отложений производился с помощью коробчатого пробоотборника Vox-Corer. Глубина отбора проб 0-50 см с поверхности дна.
- Ультразвуковая ванна и перемешивающее устройство – для разуплотнения и гомогенизации проб.
- Газовый хроматограф «КристалЛюкс 4000М» - наборный анализ проб газа, извлеченных из осадков методом «Head Space».

Результаты

По данным [Шакирова, 2018] региональный фон по метану в осадке для Центральной акватории Охотского моря составляет 3 ppm ($3 \cdot 10^{-4} \%$). Для Восточной части Охотского моря (юго-западного побережья Камчатки), а также для северо-западной части Тихого океана данный показатель не рассчитывался, вследствие малоизученности данного региона. Имеются также данные по распределению концентраций метана и его гомологов в колонках станций в районе Припарамуширского газогидратного скопления [Леин, Иванов, 2009].

В ходе сравнительного анализа были отдельно рассмотрены акватории восточного и западного побережья Камчатки, а также – Авачинской губы и бухты Русской, так как концентрация метана там значительно отличаются от общего уровня концентраций (рис. 2).

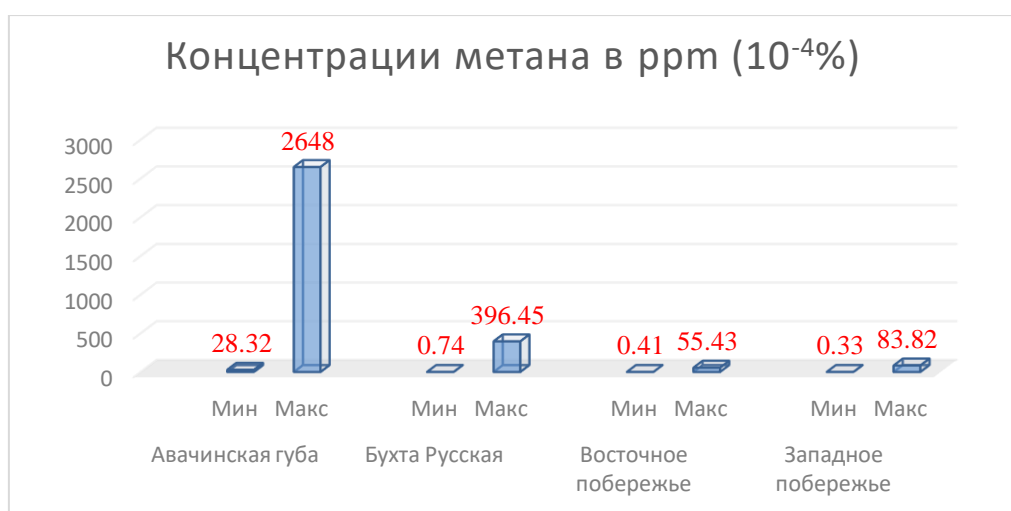


Рис. 2 – Концентрация метана в разных секторах акваторий полуострова Камчатка.

В результате проведенных исследований в составе газа донных отложений обнаружены метан в концентрациях от 0,33 до 2648 ppm, этан от 0,01 до 4,94 ppm, пропан от 0,01 до 0,26 ppm, этилен от 0,01 до 1,76 ppm, пропилен от 0,01 до 0,23 ppm и углекислый газ от 0,03 до 2,12 %.

При сравнительном анализе распределения метана в мелководных акваториях западного и восточного побережья Камчатки, выделяются два района с аномальными содержаниями метана – Авачинская губа и бухта Русская (рис. 2).

В донных отложениях северо-западной части Тихого океана наблюдаются достаточно низкие концентрации метана (рис. 2) Так, максимальная концентрация метана (55,43 ppm) зафиксирована на выходе из Авачинской губы. На остальных станциях восточного побережья содержание метана в осадке практически не превышает 10 ppm, а чаще составляет не более 5 ppm (рис. 3Б). Подобная особенность распределения по всей видимости обусловлена маломощным осадочным чехлом (менее 1 км) и преимущественно песчаным типом поверхностных донных отложений, которые не обладают высокими сорбционными особенностями по удержанию газов.

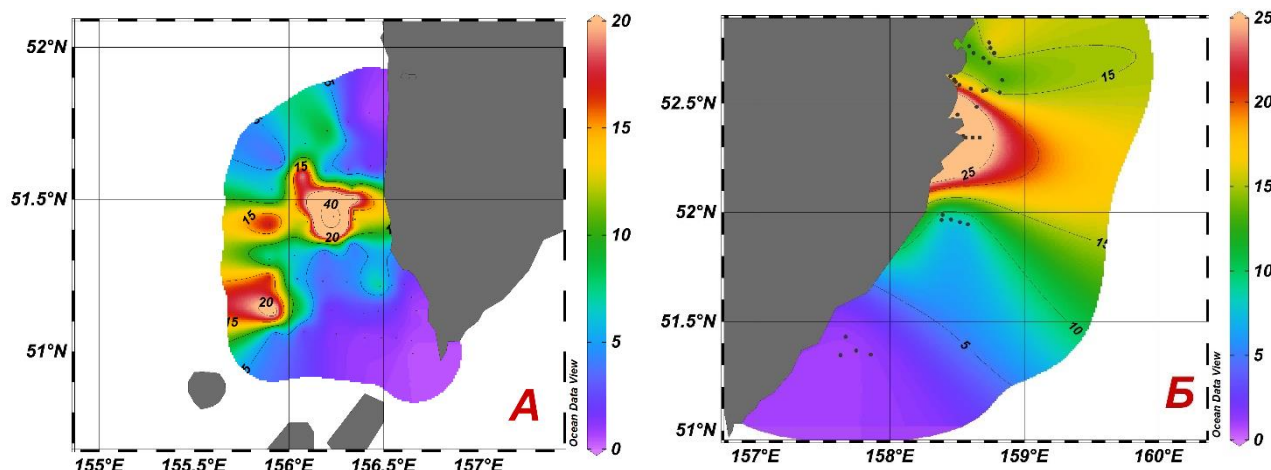


Рис. 3 – Распределение метана в нижнем горизонте (0-50 см) осадка в юго-западных (А) и юго-восточных (Б) прибрежных акваториях Камчатки.

В Авачинской губе обнаружена наиболее высокая концентрация метана и всех его гомологов. Также выделяется большое количество углекислого газа (CO_2). Максимальное значение метана достигает 2648 ppm в нижнем горизонте осадка (рис. 4).

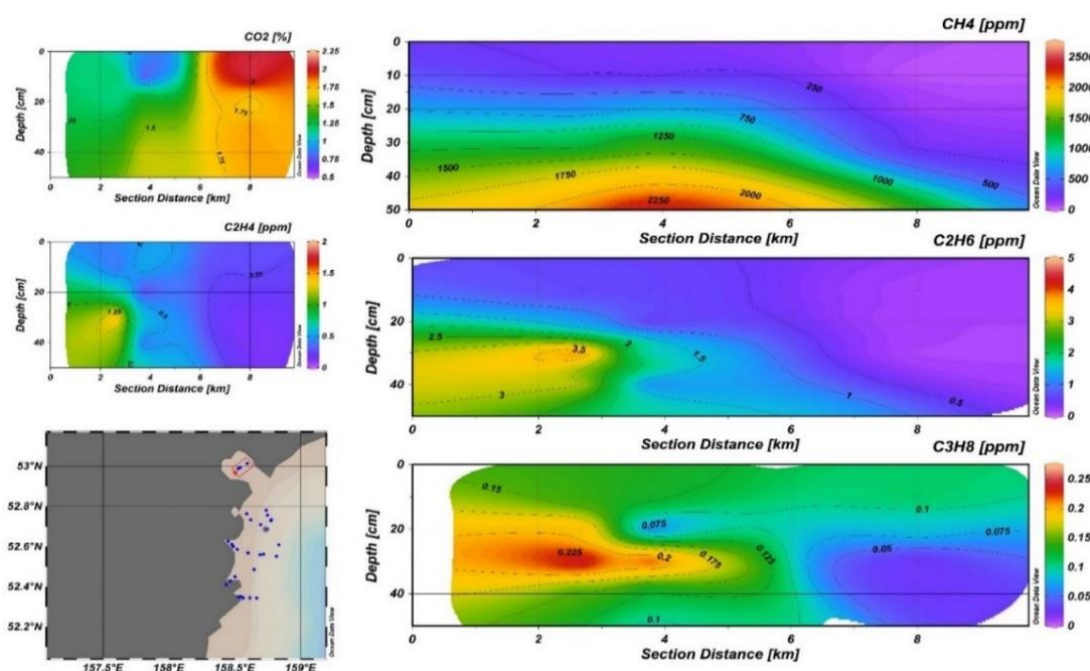


Рис. 4 – Концентрации углеводородных газов (УВГ) и углекислого газа в донных отложениях Авачинской губы.

В данном случае уместно говорить о смешанном генезисе УВГ, обусловленном влиянием нескольких факторов: повышенное осадконакопление и аккумуляция органического вещества (речной сток р. Авача), антропогенное влияние г. Петропавловск-Камчатский и структурно-геологическим строением региона (наличие разломной тектоники и сейсмоактивность района).

Концентрация метана и его гомологов в юго-западных прибрежных акваториях Камчатки можно назвать достаточно умеренной (рис. 3А). Наиболее высокие содержания метана отмечены в районе станции 73, расположенной близ поселка Озерновский (83 ppm). Возможными причинами можно назвать как антропогенное влияние поселка, речной вынос из р. Озерной, либо наличие путей миграции с осадочного чехла. Стоит отметить, что большинство станций юго-западного побережья Камчатки расположены в северо-восточной части Голыгинского прогиба, обладающим высоким нефтегазоносным потенциалом [Шакиров, 2018]. В подтверждение этому в донных осадках данной акватории присутствует повышенное содержание этана и пропана – гомологов метана, которые имеют термогенное происхождение. Кроме того, на станции 77 в придонном горизонте водной толщи были выявлены аномальные концентрации метана, свойственные зонам фокусированной разгрузки (сипам и газовым факелам). Умеренность концентраций УВГ в целом по району исследований также может указывать на достаточную закрытость недр.

В целом район акватории Голыгинского прогиба перспективен на постановку детальных геолого-геофизических работ с использованием более тяжелого пробоотборного оборудования (трубки большого диаметра, телегрейфер) и отбора длинных колонок осадков. Полученные данные в экспедиции помогут в расчете региональных фоновых значений метана и УВГ в донных отложениях, а также в детальной оценке потенциальных газоматеринских источников в исследованных акваториях.

Благодарность

Авторы признательны капитану и экипажу НИС «Профессор Мультиановский» за помощь в выполнении экспедиционного исследования. Выражаем благодарность Министерству науки и высшего образования за финансовую поддержку программы «Обучение через исследования «Плавучий Университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

Финансирование

Газогеохимические аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 23-27-00321 «Газонасыщенность донных осадков окраинных морей Евразии: распределение, влияние геологических факторов, особенности генезиса» (<https://rscf.ru/project/23-27-00321/>).

Список литературы:

1. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии – М.: ГЕОС, 2018. – 341 с. + 1 вклейка. ISBN 978-5-89118-783-2.
2. Леин А.Ю. Биогеохимический цикл метана в океане / А.Ю. Леин, М.В. Иванов; отв. ред. А.П. Лисицын; Ин-т микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. - М.: Наука, 2009. - 576 с.

УДК 504.423

Рубрика 31.23.00

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В АКВАТОРИИ ЮГО-ЗАПАДНОГО
ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА

PECULIARITIES OF METHANE DISTRIBUTION IN THE WATER AREA OF THE
SOUTHWESTERN COAST OF THE KAMCHATKA PENINSULA

Новиков Олег Сергеевич¹, Яцук Андрей Вадимович^{2,3}, Швалов Дмитрий Александрович², Бовсун Мария Александровна^{2,3}, Корнеева Анна Олеговна⁴, Медведева Александра Алексеевна⁴, Малицкий Сергей Игоревич⁵.

¹ ДГТУ, Ростов-на-Дону

² ТОИ ДВО РАН, Владивосток

³ Far Eastern Climate Smart Lab, Владивосток

⁴ БФУ им. И. Канта, Калининград

⁵ ДВФУ, Владивосток

Novikov Oleg Sergeevich¹, Yatsuk Andrey Vadimovich^{2,3}, Shvalov Dmitry Aleksandrovich², Bovsun Maria Aleksandrovna^{2,3}, Korneeva Anna Olegovna⁴, Medvedeva Alexandra Alekseevna⁴, Malitsky Sergei Igorevich⁵.

¹ DSTU, Rostov-on-Don

² POI FEB RAS, Vladivostok

³ Far Eastern Climate Smart Lab, Vladivostok

⁴ Immanuel Kant BFU, Kaliningrad

⁵ FEFU, Vladivostok

Аффилиация

Работа выполнена в рамках научно-образовательной программы «Плавающий университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

Affiliation

The research was performed within the framework of the scientific and educational program Floating University (research project № 075-01593-23-06).

Введение

Охотское море (ОМ) обладает высокой сейсмотектонической активностью поскольку расположено в окружении региональных тектонических плит – Амурской, Евроазиатской, Североамериканской, Беринговской, Тихоокеанской. В работе Шакирова Р.Б. [1] Охотское море характеризуется как объект, в котором действуют активные геологические процессы, способствовавшие накоплению углеводородных полезных ископаемых и активной

современной дегазации некоторых районов дна. В настоящей работе рассмотрены результаты рейса № 23/4 НИС «Профессор Мультановский» (15 август – 21 сентября 2023 г.) в рамках программы «Тихоокеанский плавучий университет». Данные собраны отрядом морской геологии и лабораторией газогеохимии ТОИ ДВО РАН.

Основным объектом нашего исследования является акватория юго-западного побережья Камчатки. Рассматриваемым предметом исследования были природные газы, растворённые в водной толще. Актуальность исследования газогеохимических полей метана, углеводородных газов, гелия, водорода, углекислого газа, азота, кислорода и других связана с возможностью их использования как индикаторов явлений и процессов в геологии, геохимии, океанологии и морской биологии.

Степень разработанности региона Охотского моря в геолого-геофизическом отношении достаточно высокая. Здесь за последние сорок лет советскими и российскими геологами и геофизиками была проделана огромная работа по решению научно-исследовательских и практических задач. Основной вклад принадлежит научным и производственным организациям (ОАО «Роснефть» «Сахалинморнефтегаз», «Сахалингеофизразведка», ГП «Востокгеология», «Дальморгеология», трест «Дальморнефтегеофизика», ФГУНПП Севморгео, ВНИИОкеангеология и др.) и научно-исследовательским институтам Российской академии наук: ТОИ ДВО РАН, ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИО РАН и др.

Основной целью настоящего исследования было получить данные об уровне концентраций и пространственном распределении метана в водной толще исследуемого региона.

Для этого были выполнены следующие практические **задачи**:

1. Организовать отбор и анализ проб на метан в судовых условиях;
2. Проанализировать количественное и пространственное распределение метана в водной толще;
3. Выделить возможные региональные источники поступления метана в водную толщу.

Данные и методы

Для отбора проб морской воды применялся кассетный пробоотборник с установленными на него батометрами Нискина и CTD-зондом Sea-bird SBE 911 Plus. Отбор проб производился в заранее подготовленные стеклянные герметично закрывающиеся ёмкости объёмом 120 мл. Газовые компоненты (CH₄, CO₂ и гомологи метана) в пробах морской воды определяли в судовых условиях на хроматографе «КристалЛюкс-4000М» (Россия) методом «Headspace». Полученные данные были внесены в программу Ocean Data View 4 для построения площадных карт и разрезов.

Всего в ходе экспедиции было отобрано и проанализировано 511 проб воды на 94 океанографических станциях.

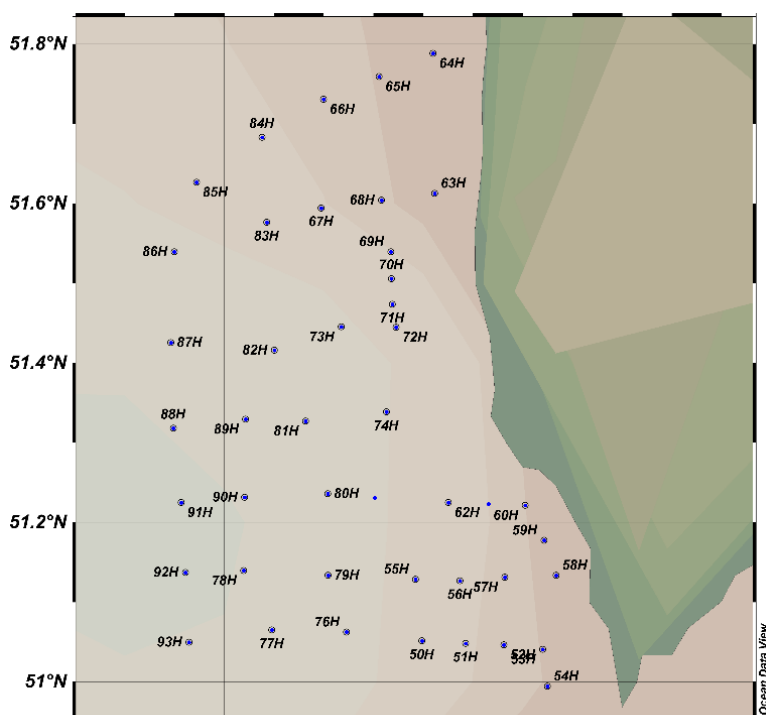


Рисунок 1. Карта океанографических станций, рассмотренных в настоящей работе.

В данной работе рассматриваются 43 океанографические станции, выполненные на юго-западном побережье, где было взято 274 пробы воды. Горизонты опробования варьировали от 0 до 770 м.

Результаты

В ходе работы были получены площадные карты, показывающие качественное и количественное распределение углекислого газа и метана, соответственно. Ниже представлены наиболее интересные из них (рис. 2, 3, 4, 5).

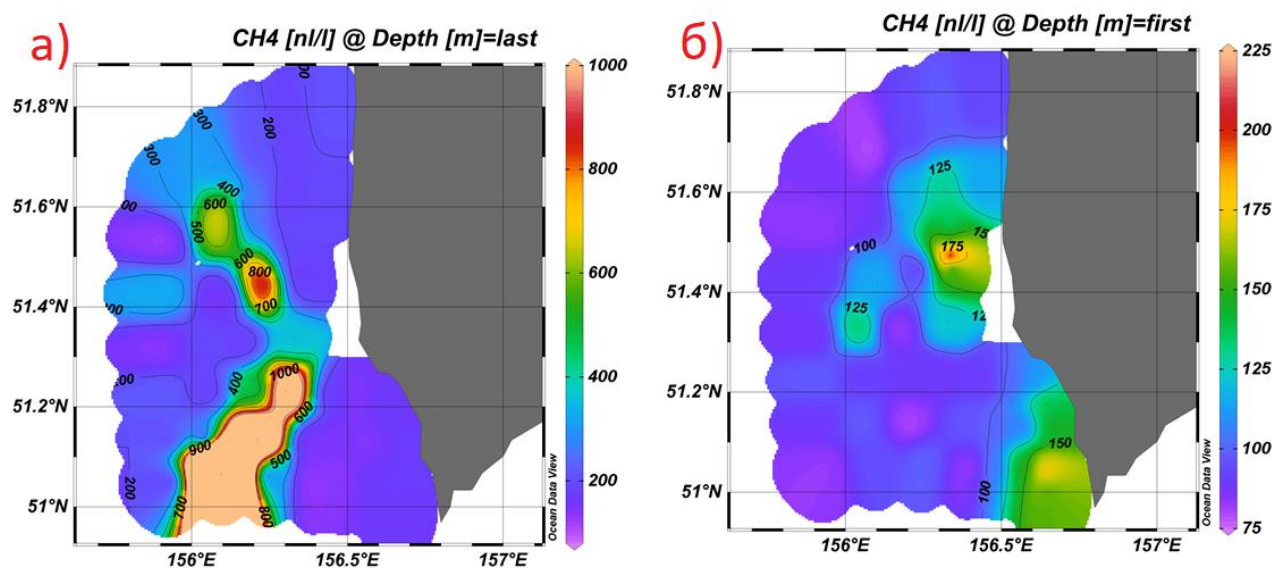


Рисунок 2. Карты площадного распределения метана на разных горизонтах: а) Придонный, б) Поверхностный.

В целом на акватории юго-западного побережья Камчатки концентрации метана варьировали от 79 до 9639 нл/л, среднее значение 235 нл/л.

В поверхностном горизонте концентрации метана варьировались в пределах от 79 до 223 нл/л, среднее значение 109 нл/л. Максимальные значения в поверхностном слое обнаружены в прибрежных акваториях в районе пос. Озерновский и бухтах Марии и Камбальной (рис. 1б). На остальной акватории приповерхностные концентрации были близки к фоновым значениям (80-100 нл/л), установленным для Охотского моря [1, 2].

В придонном горизонте концентрации метана изменялись от 85 до 9639 нл/л, в среднем 500 нл/л. Наибольшая концентрация была обнаружена на станции 77, составляющая 9639 нл/л (рис. 1а, 2, 3). Такая высокая локальная концентрация может быть связана с присутствием в районе зон фокусированной разгрузки, газовых факелов, что неоднократно подтверждалось исследованиями нефтегазоносного и гидратоносного шельфа и склона северо-восточного Сахалина и Припарамуширского района [2, 3, 4]. Примечательно что вместе с этим на станции 77 были зафиксированы высокие концентрации CO_2 , свидетельствующие, вероятно об активных процессах окисления флюида в приповерхностных горизонтах водной толщи (рис. 4). Также повышенные концентрации метана в придонном горизонте были обнаружены на ряде станций, отобранных на континентальном склоне, вдоль изобат 250-400 метров, что говорит о наличии потенциальных источников метана и его активном поступлении в водную толщу (рис. 2).

Район обследованной акватории юго-западного побережья Камчатки в геологическом отношении приурочен к перспективному нефтегазоносному Голыгинскому осадочному бассейну [1]. Полученные в экспедиции данные подтверждают актуальность данного региона для дальнейших исследований гидратоносности и нефтегазоносности недр и процессов активной флюидодинамики.

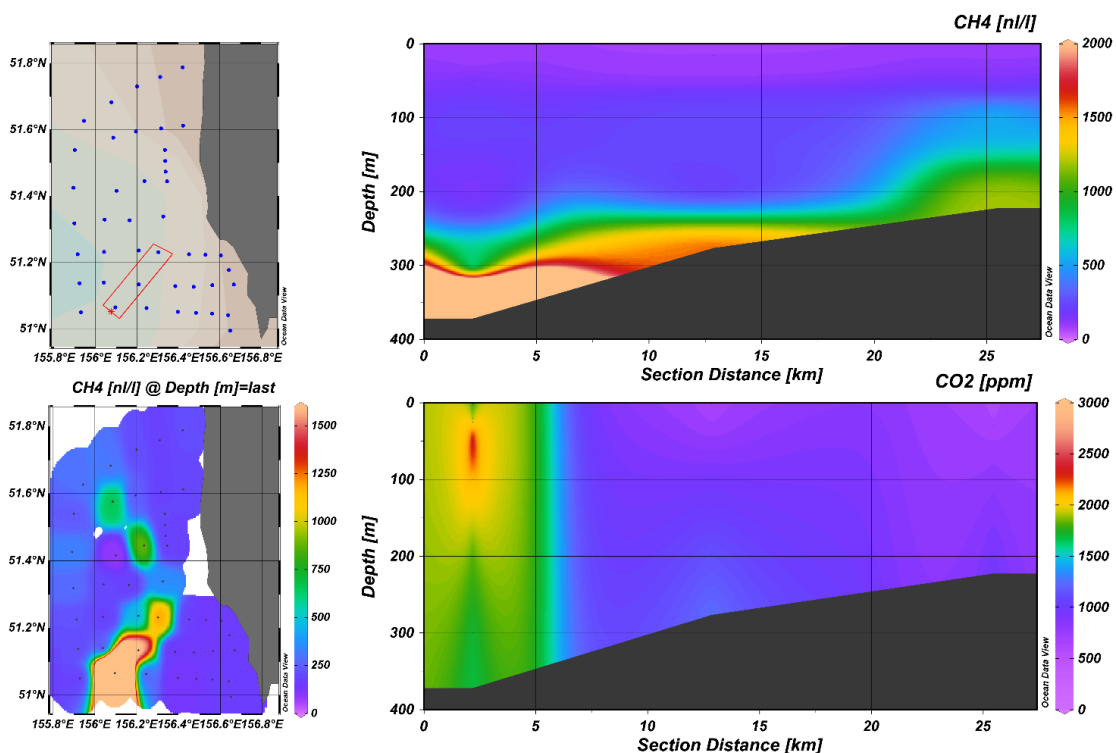


Рисунок 3. Разрезы по океанографическим станциям с наибольшими концентрациями метана в придонном горизонте в сравнениях с концентрациями CO₂ на тех же станциях.

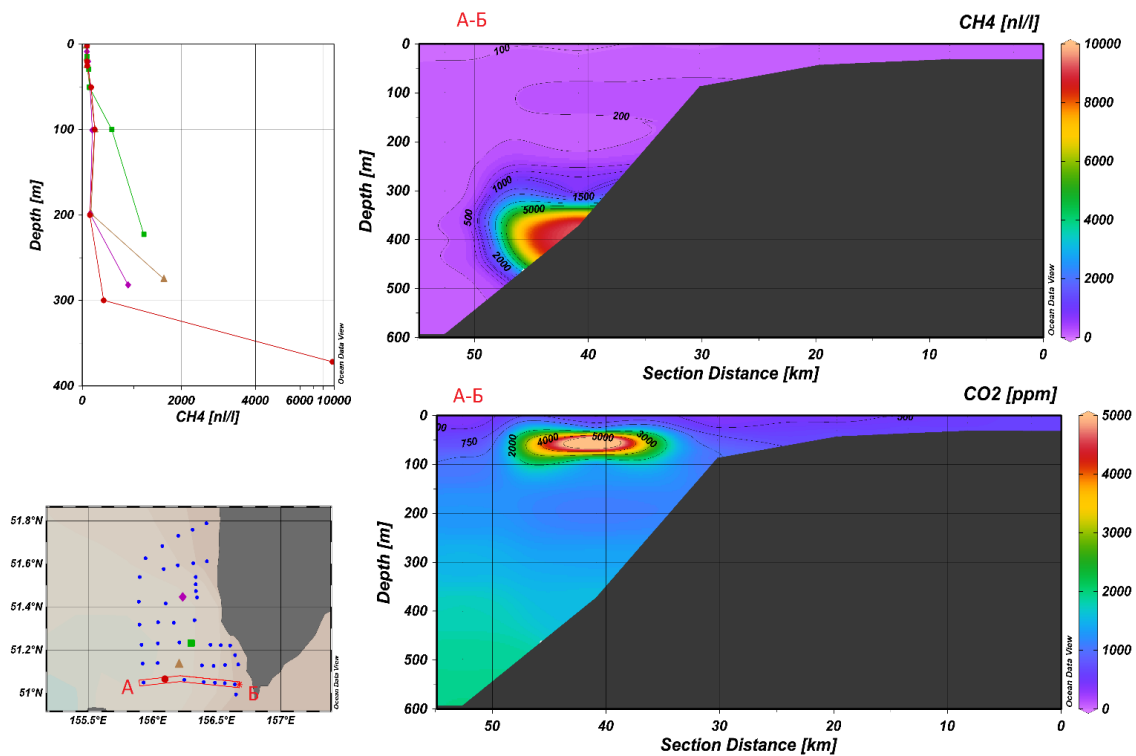


Рисунок 4. Разрезы по линии шельф-склон, с позициями станций с аномальными содержаниями метана в водной толще.

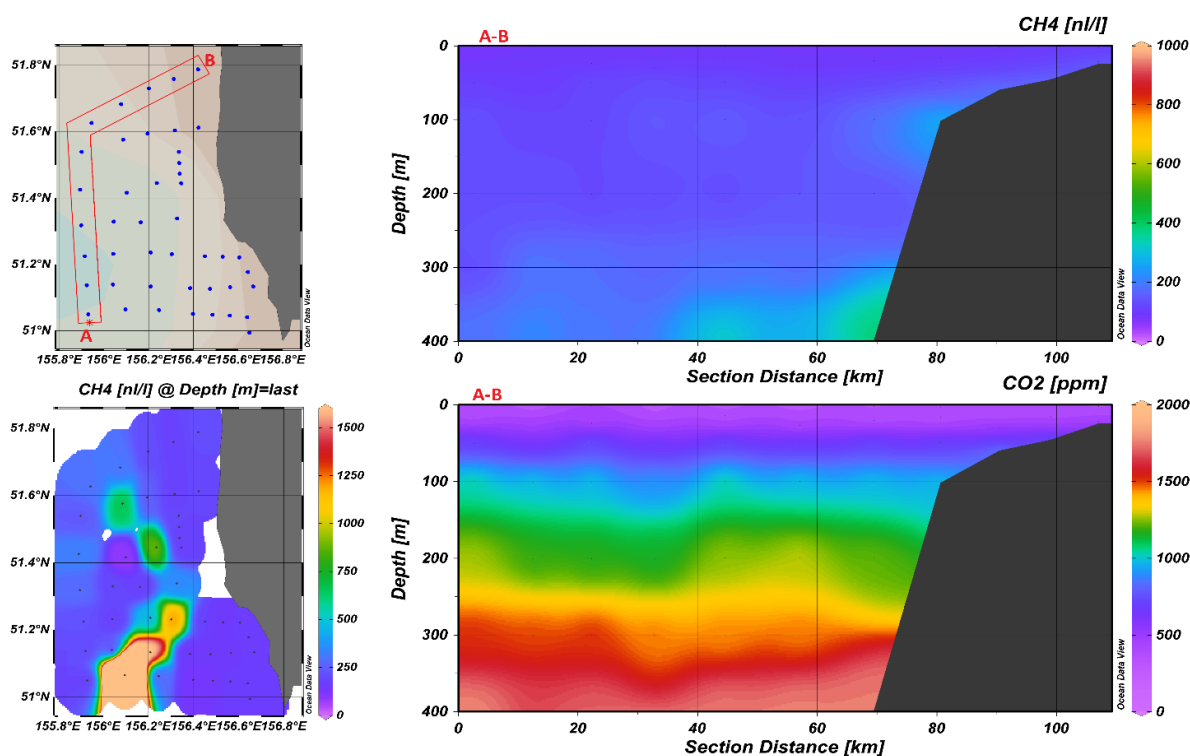


Рисунок 5. Разрезы океанографических станций с низкими (фоновыми) концентрациями.

Выводы

Как видно из приведённых разрезов и карт площадного распределения, самым газонасыщенным является придонный горизонт, что свидетельствует о влиянии и разгрузке метана из донных отложений. На разрезах, представленных на рисунках 4 и 5 хорошо видно, что заметное повышение концентрации происходит на глубинах порядка 300-400 м, что потенциально соотносится с границей зоны стабильности газогидратов. Также приведённые данные могут говорить в пользу возникновения очага разгрузки метана на склоне вследствие оползневых процессов, что могло привести к дестабилизации газогидратов или открытию дополнительных каналов миграции газов. Район исследования перспективен для постановки дальнейших детальных нефтегазопроисследовательских работ.

Благодарность

Авторы благодарят руководство «Плавучего университета» за предоставленную возможность принять участие в экспедиции, а также признательны капитану и экипажу НИС «Профессор Мультиановский» за помощь в выполнении экспедиционного исследования. Выражаем благодарность Министерству науки и высшего образования за финансовую поддержку программы «Обучение через исследования «Плавучий Университет» (соглашение № 075-01593-23-06).

Финансирование

Газоаналитические исследования выполнены при финансовой поддержке НИР ТОИ ДВО РАН: ФНТП «Разработка системы климатического мониторинга дальневосточных морей» в рамках мероприятия «Климатический и экологический мониторинг ключевых районов Мирового

океана, прибрежных зон и морей России, включая характеристики циркуляции, теплосодержания и потоков парниковых газов и энергии на границе океан-атмосфера» (рук. от ТОИ ДВО РАН – академик РАН Долгих Г.И.); «Важнейшего инновационного проекта государственного значения "Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (рук. от ТОИ ДВО РАН – академик РАН Долгих Г.И.).

Список литературы:

1. Шакиров Р.Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии – М.: ГЕОС, 2018. – 341 с.
2. Акуличев В. А., Обжиров А. И., Шакиров Р. Б., Мальцева Е. В., Гресов А. И., Телегин Ю. А. Условия формирования газогидратов в Охотском море // Доклады Академии наук – 2014. – Т. 454. № 3 – С. 340–342.
3. Леин А.Ю. Биогеохимический цикл метана в океане / А.Ю. Леин, М.В. Иванов; отв. ред. А.П. Лисицын; Ин-т микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН. - М.: Наука, 2009. - 576 с.
4. Обжиров А.И., Телегин Ю.А., Болобан А.В. Потоки метана и газогидраты в Охотском море // Подводные исследования и робототехника – 2015. № 1 (19) – С. 56-63.

Морские ландшафты

Устные доклады

Marine underwater landscape

Oral presentations

УДК 502.2.05 : 57.045

Рубрика 39.19.25

ЛАНДШАФТНО-БИОНОМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ И КОСМИЧЕСКИЙ
МОНИТОРИНГ СЕЗОННОЙ И МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ CHL-A
ФИТОПЛАНКТОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЯПОНСКОГО МОРЯ

LANDSCAPE BIONOMIC ZONING AND SPACE MONITORING OF SEASONAL
AND MULTIANNUAL CHL-A PHYTOPLANKTON PATTERN IN THE NORTHERN-
WEST OF THE SEA OF JAPAN

Ракитин Тихон Дмитриевич

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Rakitin Tikhon Dmitrievich

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

Введение

Нерито-пелагиаль (береговая зона) и шельф северо-западной части Японского моря обладают высокой активностью гидробионтов за счёт локальных экологических условий региона. В береговой зоне моря происходят сезонные колебания температуры на поверхности моря и с этим же выстраивается концентрация содержания Chl-a фитопланктона. Для изучения пространственно-временной динамики фитопланктона предлагается комплексный метод, подстраивающий два предлагаемых метода ландшафтно-биономическое районирование и космический мониторинг береговой зоны и шельфа северо-западной части Японского моря.

В первом методе учитываются принципы ландшафтно-биономического районирования областей (районов), предложенные К. М. Петровым. Основой районирования северо-западной части Японского моря служат морфоструктурные особенности берегов с выделами районов и их краткая ландшафтно-биономическая характеристика.

Во втором методе обозначены пространственный охват районов и сезонная и многолетняя динамика фитопланктона в эвфотическом слое 1-о этажа верхней области пелагиали (эпипелагиали). Предложенный автором, этих тезисов, метод выявляет с помощью средств интерактивного и регрессионного анализа закономерность между сезонным и многолетним ходом температуры поверхности воды и содержанием концентрации Chl-a фитопланктона в их жизнедеятельных районах с космических изображений полярно-орбитального спутника "Aqua", NASA, за 20 лет (2003-2022 гг.). К показателям хода температуры поверхности воды (ТПВ_{спут} °С) и концентрации Chl-a_{спут} (мг/м³) прилагаются статистические результаты регрессионного анализа, подтверждённого значимостью p-value ($0,01 \leq 0,05 \leq 0,10$), и среднее квадратичное отклонение (σ) от выборки.

1. Объект, методы и материалы исследования

Северо-западная часть Японского моря располагается в отметках географических координат 40-55° с.ш. 130-144° в.д. Области ландшафтно-биономического районирования с учётом вытягиваются с юга на северо-запад. Границы областей (районов) пролегают от части суши

до бровки шельфа: I. Сихотэ-Алиньская область: 1.1. Южно-приморский (41-43° с.ш. и 131-133° в.д., м. Гамова и м. Лихачёва) и 1.2. Центральном-приморский районы (42-46° с.ш. и 133-139° в.д., м. Лихачёва и м. Бакланий); II. Сахалинская область: 2.1. Северный район (49-52° с.ш. и 142-143° в.д., м. Тык и м. Ламанон) и 2.2. Перешеек поясок (47-49° с.ш. и 142-143° в.д., м. Ламанон и м. Яблоновый) и 2.3. Южный район (46-47° с.ш. и 142-143° в.д., м. Яблоновый и м. Криньон); III. Область северной части Татарского пролива мелководная и единит континентальную и островную сушу (52-53° с.ш. и 141-142° в.д. и 49-52° с.ш. и 142-143° в.д., м. Южный и м. Тык – нижняя граница; 54° с.ш. и 141-142° в.д., зал. Счастья и о. Байдукова – верхняя граница).

Ландшафтно-биономическое районирование северо-западной части Японского моря проводилось с использованием космического изображения Японского моря SASPlanet-GoogleEarth Pro (v.19121.10095) и его обработкой в GlobalMapper Pro (v.23.1) и Photoshop (v.2022). Вымерен батиметрический профиль шельфа в районах для определения типов берегов с 4-х морских навигационных карт масштаба 1:500000 (1966, 1967, 1969). Значения профилей шельфа интегрированы в растровые модели Surfer (v.20.1.195).

Пространственно-временная динамика Chl-a фитопланктона изучена путём сборки космических снимков с заданными параметрами (L3, стандартные продукты, сгруппированные по месяцам, резолуция 9 км) в разных полях видимости радиометрических – 240 и спектрометрических – 240 (480) за 20 лет (2003-2022 гг) Сборка получена с OceanColorWEB Data.

2. Применение метода ландшафтно-биономического районирования для изучения пространственной динамики фитопланктона

Для изучения региональных особенностей динамики фитопланктона предлагается метод ландшафтно-биономического или экологического районирования береговой зоны и шельфа, разработанный К. М. Петровым. Принципы районирования гласят, что его основой служит морфоструктурный каркас, который слагает наземные и подводные формы рельефа с однотипными морфогенетическим строением и подводными угодьями [Петров К. М., 2020]. Экологическое районирование береговой зоны и шельфа Мирового океана выполнено сотрудниками Американского института биологических наук [Spalding M. D. et al, 2007]. Авторы выделяют 12 царств, 62 провинции и 232 экорегиона (моря). В Умеренном Северо-Пацифическом царстве у берегов России располагается Холодно-Умеренная Западно-Пацифическая провинция, в которой выделяются экорегионы: Охотское море, Камчатский шельф и берег, Японское море.

На суше, окаймляющей Японском море, палеогеновые складчатые структуры Горной страны Сихотэ-Алинь Приморья и Западно-Сахалинский хребет о. Сахалин образовали однотипные ландшафты, находящиеся под воздействием новейших и современных дифференцированных тектонических движений [Николаев Н. И., 1962; Шульц С. С., 1979]. Тектоника определила подвижность крупных морфоструктур поднятиями и опусканиями берегов. Под её воздействием образуются берега продольного и поперечного типов: у продольных оси складок идут вдоль береговой линии; поперечных – оси складок располагаются по нормали к берегу. В северо-западной части Японского моря выделяются следующие области и районы (рис. 1).



Рис. 1. Ландшафтно-биономическое районирование береговой зоны северо-западной части Японского моря.

I. Сихотэ-Алинская область, районы: 1.1. Южно-приморский и 1.2. Центральнo-приморский; II. Островная Сахалинская область, районы: 2.1. Северный район Западно-Сахалинских гор, 2.2. Перешеек поясок и 2.3. Южный район Западно-Сахалинских гор; III. Область северной части берегов Татарского пролива. Краткое и детальное описание биономических условий районов приведены в (см. результаты и их обсуждение).

3. Применение метода космического мониторинга при изучении пространственно-временной динамики фитопланктона

Пространственная и временная техническая возможность метеорологических спутников широко применяется для реализации масштабного и комплексного изучения: океанов, морей, заливов, локальных морских экосистем и пространственного распределения фитопланктона [Behrenfeld et. el, 2009; Antoine et al., 2015]. Датчики сканеров спутников регистрируют биофизические параметры воздушной и водной среды и метеорологические условия среды [Левин В. А. и др, 2010]. В рамках написания работы используются спутниковые спектрорадиометрические показатели температура поверхности воды (°C) и концентрация Chl-a ($\text{мг}/\text{м}^3$) фитопланктона сканера MODIS полярно-орбитального спутника "Aqua", NASA.

Спутниковый показатель Chl-a фитопланктона может превышать его действительные значения в фотическом слое воды. На это влияют по словам Р. Р. Станичной и др. [2020] наличие различных цветных пигментов Chl-a и погрешности заданных стандартных продуктов MODIS-Aqua. Атмосферные факторы (облачность, аэрозольные частицы, пыль) также снижают точность рассчитываемых значений [Суетин В. С. и др., 2002]. Для надёжности расчётов требуется кросс-калибровка спутниковых каналов [Левин В. А. и др.,

2010], которые со временем становятся не точными из-за изношенности оборудования, и сравнение строящихся математических моделей с судовыми данными на *in situ* наблюдениях.

Данный метод предлагается автором тезисов, чтобы выявить корреляцию между ходом температуры поверхности воды и содержанием концентрации Chl-a фитопланктона за каждый сезон с 2003 по 2022 гг. в исследуемых районах северо-западной части Японского моря (см. результаты ниже).

4. Результаты и их обсуждение

Приведём краткую и детальную ландшафтно-биономическую характеристику выделенных районов исследования северо-западной части Японского моря и сезонный и многолетний (2002-2022 гг.) ход температуры поверхности воды (ТПВ_{спут} °С) и концентрацию Chl-a_{спут} (мг/м³) фитопланктона вместе с результатами значимости p-value и среднего квадратичного отклонения (σ).

I. Сихотэ-Алинская область. Сихотэ-Алинская область включает два района 1.1. Южно-приморский и 1.2. Центральнo-приморский.

1.1. Южно-приморский район. В данном районе хребты простираются по нормали к берегу (берег поперечного типа), заливы: Амурский, Усуйский, Петра Великого разделены мысами, многочисленные о-ва, шельф широкий. В заливе Петра Великого угодье каменистых грунтов обрастает крупной бурой водорослью – ламинарией и беспозвоночными: мидиями, губками, серпулидами и др. По дну ползают морские звёзды, ежи и др. Каменистый грунт переходит в угодье песчаных грунтов. Для него характерны заросли морской травы – зостеры (*Zoostera Marina*). В песок закапываются черви – пескожилы, на дне лежат двусторчатые моллюски – гребешки, ползают трепанги и морские ежи [Арзамасцев И. С., Преображенский Б. В., 1990].

1.2. Центральнo-приморский район. Оси складок направлены параллельно берегу (берег продольного типа), берега высокие, денудационно-абразионные, с активным клифом, шельф узкий. В литорали преобладают заросли фукусовых (*Fucus evanescens*, *Pelvetia wrightii*). Растительность пояса скал сублиторали представлена зарослями бурых (*Saccharina japonica*, *S. cichorioides*; *Sargassum pallidum*, *S. miyabei*, *Costaria costata*, *Agarum clathratum*) и красных водорослей (*Ptilota filicina*, *Tichocarpus crinitus*, *Bosiella cretacea*), встречаются куртины морской травы *Phyllospadix iwatensis* [Дуленина А. А., Колпаков Н. В., 2019]. В нижней сублиторали (15-20 м.) ветвистые формы макрофитов уступают место красным корковым водорослям, обрастающим каменистые поверхности. Ниже сублиторали начинают присутствовать беспозвоночные животные: гидроиды, губки, мшанки, серпулиды, баянусы, актинии, асцидии и мидии и др. [Петров К. М., Поздеев В. Б., 1992].

В Южно-приморском районе средние значения ТПВ_{спут} за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой-весной сниженные (1,1-3,7°С) и увеличенные – летом-осенью (17,5-13,0°С); средние значения концентрации Chl-a_{спут}: зимой и весной – высокие (4,4, 4,7 мг/м³), на убыль летом (1,0 мг/м³) и осенью приближается к «потолку» (5,5 мг/м³). Зимой корреляция температур и хлорофилла статистически значима при уровне p-value 0,07, σ – ТПВ 0,3 (°С) и Chl-a 3,6 (мг/м³) с погрешностью на аномалии; весной корреляция температур и хлорофилла статистически значима p-value 0,02, σ – ТПВ 0,8 (°С) и Chl-a 1,3 (мг/м³) с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически не значима p-value 0,28, σ – ТПВ 1,3 (°С) с погрешностью на аномалии и Chl-a 0,4 (мг/м³) без аномалий; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне p-value 0,69, σ – ТПВ 1,1 (°С) и Chl-a 2,2 (мг/м³) с погрешностью на аномалии.

В Центрально-приморском районе средние значения $ТПВ_{спут}$ за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой-весной сниженные ($1,1-2,7^{\circ}\text{C}$) и увеличиваются к лету ($14,7^{\circ}\text{C}$), осенью снижаются ($11,5^{\circ}\text{C}$); средние значения концентрации $Chl-a_{спут}$: зимой минимум ($1,1 \text{ мг/м}^3$), весной максимум ($5,0 \text{ мг/м}^3$), летом падает ($1,3 \text{ мг/м}^3$), а осенью вырастает ($2,4 \text{ мг/м}^3$). Зимой корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,12$, σ – $ТПВ 0,4 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 0,4 (\text{мг/м}^3)$ без аномалий; весной корреляция температур и хлорофилла статистически значима $p\text{-value } 0,01$, σ – $ТПВ 0,7 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,7 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,45$, σ – $ТПВ 0,9 (^{\circ}\text{C})$ с погрешностью на аномалии и $Chl-a 0,4 (\text{мг/м}^3)$ без аномалий; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,76$, σ – $ТПВ 0,7 (^{\circ}\text{C})$ с погрешностью на аномалии и $Chl-a 0,9 (\text{мг/м}^3)$ без аномалий.

II. Островная Сахалинская область, районы: 2.1. Северный район Западно-Сахалинских гор, 2.2. Перешеек поясок и 2.3. Южный район Западно-Сахалинских гор.

На территории области пролегает Западно-Сахалинский хребет, с которым связаны 3 района: 2.1. Северный и 2.3. Южный, испытывающие активное поднятие, и район замедленных поднятий – 2.2. Перешеек Поясок. Берега Северного и Южного районов высокие продольные с преимущественно активным клифом, подводно-береговой склон приглубый, окаймлённый поясом скал глубиной до 40 м, шельф узкий. В Северном районе биоценоз угодий твёрдого и мягкого грунтов аналогичен Центрально-приморскому району. В Южном районе в литорали и верхней сублиторали (1-3 м) к каменистому грунту прикреплены плотные заросли *Corallina pilulifera* (“кораллиновые тротуары”), в средней (5-10 м) и нижней (20-25 м) сублиторали доминируют сообщества *Sargassum pallidum*, *S. miyabei* [Дуленин А. А., 2020], состав бентоса сублиторали и дна аналогичен бентосу Южно-приморского района. Центр о. Сахалин перекрыт небольшим районом, именуемый 2.2. Перешеек Поясок. Здесь интенсивность поднятия резко снижается. Берега в основном аккумулятивные. Благодаря складкам, продолжающимся в море (берег поперечного типа), ширина шельфа увеличивается до 60 км.

В Северном районе средние значения $ТПВ_{спут}$ за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой-весной минимальные ($0,4-1,6^{\circ}\text{C}$), летом отмечен максимум ($14,1^{\circ}\text{C}$) и осенью понижение ($10,0^{\circ}\text{C}$); средние значения концентрации $Chl-a_{спут}$: зимой минимум ($1,5 \text{ мг/м}^3$), весной пик ($7,0 \text{ мг/м}^3$), летом спад ($3,0 \text{ мг/м}^3$), осенью вырастает до ($6,0 \text{ мг/м}^3$). Зимой корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,69$, σ – $ТПВ 0,4 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,7 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; весной корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,27$, σ – $ТПВ 0,6 (^{\circ}\text{C})$ без аномалий и $Chl-a 2,0 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически значима $p\text{-value } 0,09$, σ – $ТПВ 1,1 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,6 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически значима при уровне $p\text{-value } 0,05$, σ – $ТПВ 1,1 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 2,2 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии.

В районе Перешеек поясок средние значения $ТПВ_{спут}$ за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой-весной минимальные ($0,4-1,6^{\circ}\text{C}$), летом отмечен максимум ($14,1^{\circ}\text{C}$), а осенью убывание ($10,3^{\circ}\text{C}$); средние значения концентрации $Chl-a_{спут}$: зимой на «полу» ($2,1 \text{ мг/м}^3$), весной «потолок» ($6,0 \text{ мг/м}^3$), летом на убыль ($2,2 \text{ мг/м}^3$), осенью вырастает до ($4,7 \text{ мг/м}^3$). Зимой корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,31$, σ – $ТПВ 0,4 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,2 (\text{мг/м}^3)$ без аномалий; весной корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,41$, σ – $ТПВ 0,8 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,8 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,40$, σ – $ТПВ 0,9 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 2,2 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически значима при уровне $p\text{-value } 0,07$, σ – $ТПВ 1,2 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,6 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии.

В Южном районе средние значения $ТПВ_{спут}$ за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой минимум ($1,3^{\circ}\text{C}$), весной повышается до ($3,7^{\circ}\text{C}$), летом максимум ($15,3^{\circ}\text{C}$), осенью убывает к ($12,2^{\circ}\text{C}$); средние значения концентрации $Chl-a_{спут}$: зимой «пол» ($0,9 \text{ мг/м}^3$), весной «потолок» ($4,6 \text{ мг/м}^3$), летом понижается до ($1,2 \text{ мг/м}^3$) и осенью повышается к ($3,2 \text{ мг/м}^3$). Зимой корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,97$, σ – $ТПВ 0,6 (^{\circ}\text{C})$ с погрешностью на аномалии и $Chl-a 0,4 (\text{мг/м}^3)$ без аномалий; весной корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,48$, σ – $ТПВ 0,6 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,4 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,33$, σ – $ТПВ 1,2 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 0,7 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,12$, σ – $ТПВ 1,3 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 1,5 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии.

III. Область северной части Татарского пролива Неглубокие воды Татарский пролива объята континентальной и островной суши, обращённой к проливу Невельского и Сахалинскому заливу Охотского моря. В низовье устья р. Амур вклинивается лиман, до которого раскинута широкая аккумулятивная равнина на месте новейшего прогиба. Побережье о. Сахалин представлено денудационно-аккумулятивной равниной, испытывающей замедленное поднятие. Восточная азиатская часть материка и остров соединены в мелководной части пролива. В Татарском проливе морские травы (*Zostera asiatica*, *Z. marina*) на песчано-илистом грунте образуют обширные заросли [Дуленин А. А., 2020].

В области средние значения $ТПВ_{спут}$ за сезон с 2003 по 2022 гг.: зимой данных со спутника нет, весной на убыль ($2,3^{\circ}\text{C}$), летом отмечен максимум ($17,3^{\circ}\text{C}$) и осенью падает до ($8,3^{\circ}\text{C}$); средние значения концентрации $Chl-a_{спут}$: зимой данных со спутника нет, весной минимальные ($16,2 \text{ мг/м}^3$), летом максимум ($34,3 \text{ мг/м}^3$), осенью убывает до ($24,2 \text{ мг/м}^3$). Весной корреляция температур и хлорофилла статистически не значима при уровне $p\text{-value } 0,38$, σ – $ТПВ 1,5 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 8,2 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; летом корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,54$, σ – $ТПВ 1,5 (^{\circ}\text{C})$ без аномалий и $Chl-a 8,6 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии; осенью корреляция температур и хлорофилла статистически не значима $p\text{-value } 0,37$, σ – $ТПВ 0,8 (^{\circ}\text{C})$ и $Chl-a 9,8 (\text{мг/м}^3)$ с погрешностью на аномалии.

Заключение

1. Комплексный метод ландшафтно-биоэкономическое районирование и космический мониторинг повышают надёжность исследования фитопланктона на примере северо-западной части Японского моря. В первом отражаются региональные экологические особенности динамики фитопланктона и его продуктивности, во втором – показывается на космических снимках взаимосвязь между ходом температуры поверхности воды и динамикой концентрации $Chl-a$ фитопланктона заданных периодов (лет, сезонов, месяцев). 1.1. Продольный (денудационно-абразионный с активным клифом, узким шельфом) и поперечный (денудационно-аккумулятивный с мёртвым клифом, широким шельфом) типы берегов, сформированных Горной страной Сихотэ-Алинь и Западно-Сахалинским хребтом, формируют «каркас» для образования осадочного материала, растворимого в водах береговой зоны.

2. Орбитально-полярный спутник MODIS "Aqua", NASA, передаёт необходимые данные для мониторинга пространственно-временной динамики концентрации $Chl-a$ фитопланктона за сезоны и года (2003-2022 гг.). 2.1. Сезонный ход температуры поверхности воды и концентрация $Chl-a$ фитопланктона коррелирует между собой в заданный временной отрезок. 2.2. Значимость $p\text{-value}$: в Сихотэ-Алинской области с районами Южно-приморским и Централно-приморским статистически значимы зимой-весной; Островной Сахалинской

области с районами: Северным статистически значима летом-осенью, Перешейком пояском статистически значима осенью, Южным статистически не значима. 2.3. Стандартные отклонения от генерализованной выборки средних сезонных значений температуры и Chl-a показывают в некоторых случаях изменения за 20 лет (2003-2022 гг.), что выдвигает гипотезу об климатических изменениях в регионе северо-западной части Японского моря.

Список литературы

1. *Арзамасцев И.С., Преображенский Б.В.* Атлас подводных ландшафтов Японского моря. – М.: Наука, 1990. – 224 с.
2. *Дуленина А.П., Колпаков Н.В.* Состав и распределение макроэпибентоса в прибрежной зоне северо-западной части татарского пролива. Биологические ресурсы. – Владивосток: Известия ТИНРО, 2019, Т. 199. – С. 3–18. Doi: 10.26428/1606-9919-2019-199-3-18
3. *Дуленин А.А.* Оптимальные условия выделения доминантов подводной растительности на примере северо-западной части Татарского пролива. – Владивосток: Известия ТИНРО, 2020, Т. 200, В. 3. – С. 767–788. Doi: <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2020-200-767-788>
4. *Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г., Дьяков С.Е., Недолужко И.В., Фомин Е.В.* Разработка технологий мониторинга окружающей среды по данным метеорологических спутников. Новые технологии. – М.: ИАПУ ДВО РАН, 2010, №5. – С. 41–50.
5. *Николаев Н.И.* Неотектоника и её выражение в структуре и рельефе территории СССР. – М. : Госгеологтехиздат, 1962. – 392 с.
6. *Петров К.М., Поздеев В.Б.* Подводные ландшафты и фитобентос у берегов Южного Сахалина. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1992. – 128 с.
7. *Петров К.М.* Принципы биономического районирования береговой зоны и шельфа Мирового океана. Журнал Океанология, 2020, Т. 60, № 3. – С. 381 – 392. Doi: 10.31857/S0030157420030089
8. *Станичная Р.Р., Станичный С.В., Арашкевич Е. Г.* Регионально адаптированный алгоритм восстановления концентрации хлорофилла-а для Чёрного моря, анализ причин отличия спутниковых и контактных данных. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, Т. 17, №4. – С. 29–37. Doi: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-29-37
9. *Суетин В.С., Суслин В.В. Королева С.Н., Кучерявый А.А.* Оценка изменчивости оптических свойств воды в Черном море летом 1998 года по данным спутникового прибора SeaWiFS. Морской гидрофиз. Журн. Севастополь: МГИ РАН, 2002, № 6. –С. 44–54.
10. *Шульц С.С.* Тектоника земной коры: на основе анализа новейших движений. – Л. : Недра. Ленингр. отд-ние, 1979. – 272 с.
11. *Antoine D., Bentamy A., Bentamy H., and et al.* Use of satellite observations for operational oceanography: recent achievements and future prospects. Journal of Operational Oceanography, 2015, Vol. 8 (1). 12–27 pp. Doi: 10.1080/1755876X.2015.1022050
12. *Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Boss E.S. et al.* Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton. Biogeosciences, 2009, № 6. 779–794 pp.

13. *Spalding M.D., Allen G., Fox H., and Davidson N.C.* Marine ecoregions of the World: a bioregionalization of coast and shelf areas. *J. BioSci*, 2007, No. 57 (2). – pp. 573–583.

УДК 911.52

Рубрика 39.19.29

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ЛАНДШАФТОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ
БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2023 Г.

PRELIMINARY RESULTS OF GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL STUDIES OF
BOTTOM LANDSCAPES IN THE SOUTH-EASTERN PART OF THE BALTIC SEA IN
2023

Дорохов Дмитрий Владимирович^{1,2}, Дорохова Евгения Валерьевна^{1,2}, Дудков Иван Юрьевич^{1,2}

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

² *Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград*

Dorokhov Dmitriy Vladimirovich^{1,2}, Dorokhova Evgenia Valerievna^{1,2}, Dudkov Ivan Yurievich^{1,2}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Immanuel Kant Baltic federal university, Kaliningrad*

Введение

В 2023 г. Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН были проведены две экспедиции в юго-восточной части Балтийского моря (Рис. 1): 53-й рейс НИС «Академик Борис Петров» (07-27.05.2023 г.) и 54-й рейс НИС «Академик Николай Страхов» (18-22.06. 2023 г.). Цель экспедиций – получение новых данных по состоянию и динамике природных комплексов и донных ландшафтов Балтийского моря. Исследования были направлены на решение фундаментальной проблемы реконструкции эволюции ландшафтов Балтийского моря в условиях изменения климата и усиливающейся антропогенной нагрузки. Одной из основных задач рейсов было изучение абиотических компонентов донных ландшафтов геолого-геофизическими методами.

Данные и методы

Геолого-геофизические исследования проводились на океанологических станциях, геофизических профилях и полигонах (Рис. 1). Геофизические работы включали батиметрическую съемку многолучевыми эхолотами (МЛЭ) RESON SeaBat T50-ER (частота 150-420 кГц, 1024 луча) и RESON SeaBat T50-R (частота 190-420 кГц, 1024 луча), сейсмоакустическое профилирование дна – профилографами Atlas Parasound P70 и P35 (первичная частота – 18-24 кГц, параметрическая – 0,5-7 кГц). Для корректного измерения глубин МЛЭ проводилось измерение вертикального разреза скорости звука (ВРСЗ) в водной толще зондом Valeport miniSVP 600 BAR на станциях и на ходу судна с использованием специальной лебедки, разработанной в АО ИО РАН. На станциях выполнялся отбор колонок осадков большой ударной грунтовой трубкой (БУГТ) и поверхностных осадков дночерпателем Ван Вина. В колонках донных осадков на борту судна выполнены измерения магнитной восприимчивости (МВ) системой Bartington MS3 с поверхностным сенсором

MS2E. На участках, где был затруднен отбор проб поверхностных осадков, выполнялась подводная видеосъемка разработанным в АО ИО РАН экспериментальным подводным аппаратом (подводной видеокамерой). Аппарат опускался в дрейфе судна на капроновом фале с кабелем, по которому в режиме реального времени изображение передавалось на борт судна и записывалось на SD-карту.

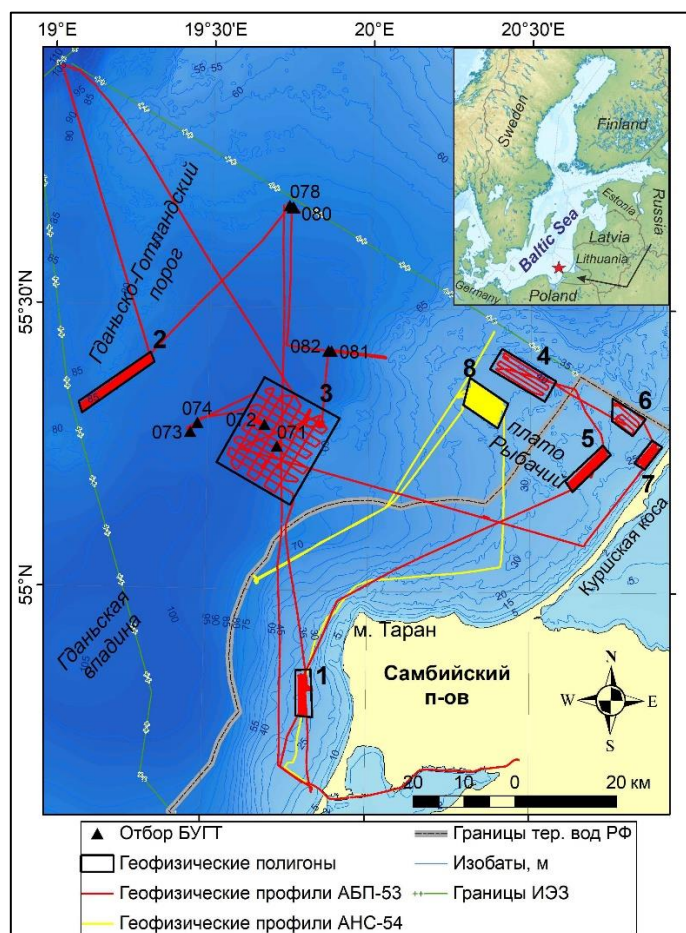


Рис. 1 – Схема геолого-геофизических исследований ИО РАН в юго-восточной части Балтийского моря в 2023 г. На врезке отмечено расположение района исследования. Батиметрическая основа взята из [Gelumbauskaite et al., 1999].

Результаты

На западном подводном береговом склоне Самбийского п-ова (Рис. 1, полигон № 1), где распространены затопленные древние береговые уступы, выявлены два палеогеновых останца длиной до 450 м и шириной до 65 м. Глубина у их основания составляет 27-30 м, что соответствует длительному стоянию уровней Балтийского ледникового и Анцилового озер. На поверхности дна залегают маломощные песчаные тела (0,5-2 м), которые вероятно сформировались в основном в результате выноса пульпы Янтарного комбината и прорезаны ложбинами стока компенсационных течений.

На северо-западном склоне Гданьской впадины на глубинах 80-88 м (Рис. 1, полигон № 2) уточнены границы распространения позднеплейстоценовых борозд айсбергового выпаживания (плугмарков) [Dokhov et al., 2018]. Ширина борозд составляет 40-300 м, глубина – до 5 м. Большинство борозд характеризуется наличием боковых валов (берм). Преобладающее направление борозд – северо-запад–юго-восток. На глубинах более 83 м плугмарки погребены под литориновыми илами Гданьской впадины (Рис. 2).

На северо-восточном склоне Гданьской впадины (Рис. 1, полигон № 3) определены границы и мощность контуритового дрифта, обнаруженного в 2022 г. Выполненная сетка галсов позволит построить его трехмерную геологическую модель и выявить особенности формирования осадочного тела течениями затоков североморских вод. Колонка АБП-530072 (Рис. 1), отобранная в вершине контуритового дрифта Гданьской впадины, показала более чем в 2 раза (2,6 м) мощность литориновых илов по сравнению с соседней колонкой АСВ-54029, отобранной в контуритовом канале в 2022 г. Это свидетельствует о преимущественном формировании дрифта в литориновую стадию Балтийского моря в результате латерального переноса осадочного вещества придонными течениями затоков североморских вод. На поверхности дна в илах впадины выявлены покмарки округлой формы, сформированные в результате высачивания газа. Также, как и на северо-западном склоне, за пределами границы выклинивания илов на поверхности плотных лимногляциальных отложений выявлены многочисленные плугмарки.

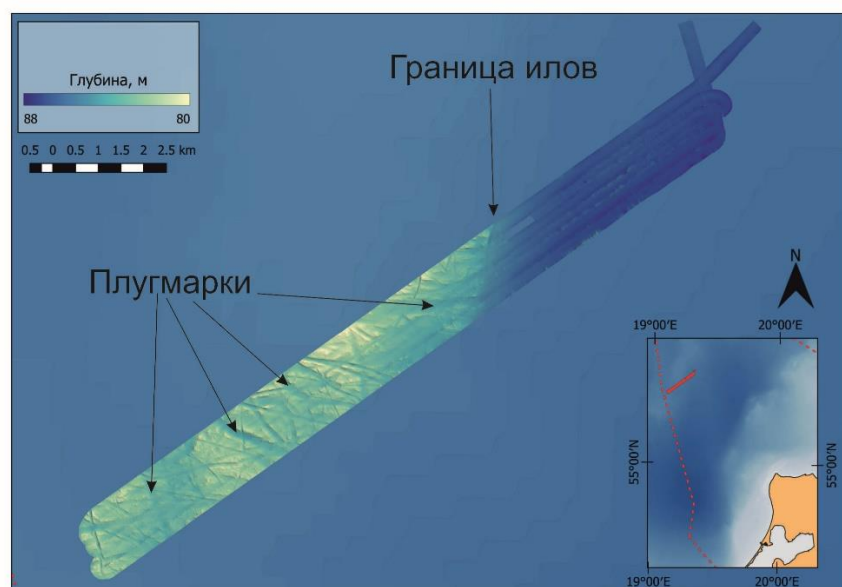


Рис. 2 – Цифровая модель рельефа дна по данным МЛЭ на полигоне № 2 в районе распространения борозд айсбергового выпаживания. На врезке красным прямоугольником показано расположение полигона.

В северо-восточной части плато Рыбачий (Рис. 1, полигоны №№ 4, 6-7) продолжены исследования песчаных тел, описанных ранее как реликтовые дюны [Блажчишин, 1998]. Сравнение выполненных повторно галсов со съемками предыдущих рейсов показало на некоторых участках динамику песчаных накоплений, что ставит под сомнение выдвинутую ранее гипотезу об их эоловом генезисе.

На подводном береговом склоне Куршской косы (центральная часть плато Рыбачий) на глубинах 20-30 м (Рис. 1, полигон № 5) выявлены остатки гряд конечной морены, сложенные валунно-галечным материалом. Гряды имеют крутой юго-восточный склон с валунной отмосткой, северо-западный склон – пологий, сложенный преимущественно песками, накопление которых вероятно обусловлено вдольбереговым потоком наносов. Подводная видеосъемка показала полное обрастание валунов мидиями, а на поверхности песчаных отложений отмечен единичный экземпляр живой камбалы. В юго-западной части района исследования зафиксированы субпараллельные моренные гряды, вероятно морены Де Геера, или гряды боковой морены (Рис. 3).

В северо-западной части плато Рыбачий на глубинах 35-40 м (Рис. 1, полигон № 8) на поверхности дна выявлено около шести крупных протяженных моренных гряд длиной 3-6 км и высотой 1-5 м. Асимметричные гряды сложены валунами и гравием, о чем свидетельствуют характерные акустические отражения на сеймопрофилях в виде гиперболических рефлекторов. Часть гряд расходятся веерообразно от южной части полигона на северо-запад, север и северо-восток. Другая серия гряд простирается субпараллельно друг другу с юго-запада на северо-восток. Межгрядовый рельеф представляет собой чешуйчатую поверхность, частично заполненную тонким слоем (до 1 м) разнозернистого песка с галькой, гравием и валунами. Секции мелких чешуйчатых гряд сонаправлены с крупными грядами. Вероятно, крупные гряды представляют краевые морены, а между ними залегает основная морена, сложенная базальным тиллом чешуйчатонадвигового строения. Такие формы рельефа характерны для краевых лопастей ледниковых потоков.

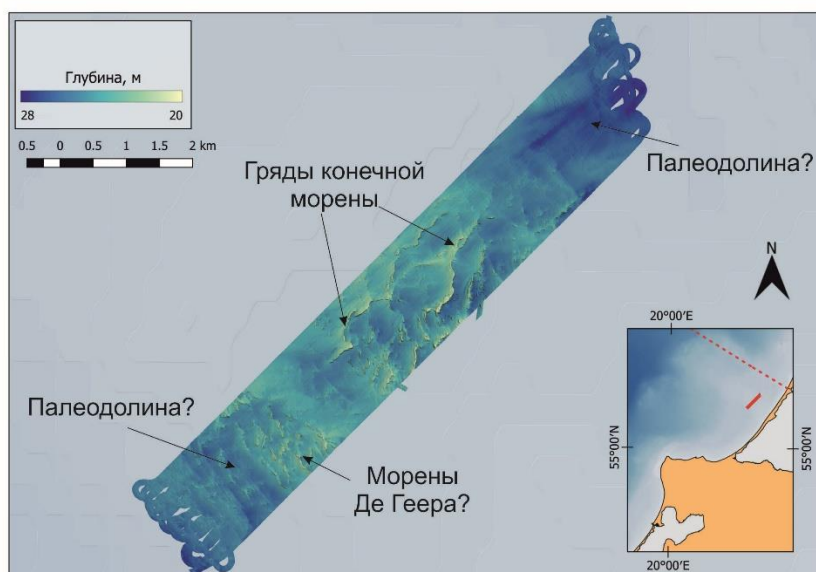


Рис. 3 – Цифровая модель рельефа дна по данным МЛЭ на полигоне № 5 в центральной части плато Рыбачий. На врезке красным прямоугольником показано расположение полигона.

В районе обнаруженных ранее магнитных аномалий в погребенных реликтовых плугмарках выполнены исследования осадочных разрезов на северном (колонки АБП-53078, АБП-53079, АБП-53080) и северо-восточном (колонки АБП-53081 и АБП-53082) склонах Гданьской впадины (Рис. 1). Согласно данным сейсмоакустического профилирования реликтовые борозды выпаживания в Гданьской впадине выработаны в осадках озерной стадии Балтийского моря. Сопоставление сейсмозаписи и литологических данных показало, что хаотические рефлекторы борта плугмарка характеризуются чередованием серых и коричневатых глин БЛО с неравномерными текстурами (конволютная, наклонная слоистость), сформированных под воздействием айсбергового/ледового выпаживания (колонка АБП-53078). Такие осадки характеризуются пониженными значениями МВ. Акустически стратифицированное и акустически прозрачное заполнение депрессий плугмарков соответствует серым и серо-коричневым глинам с многочисленными включениями и прослоями гидротроилита (колонки АБП-53079 и АБП-53080), характеризующимися высокими значениями МВ. Сопоставление с данными магнитной съемки показало, что положительные магнитные аномалии соответствуют высоким значениям МВ в осадках и маркируют погребенные борозды айсбергового выпаживания.

На северо-восточном склоне Гданьской впадины колонки АБП-53081 и АБП-53082 отобраны в районе распространения погребенных плугмарков в выступе и прогибе кровли отложений озерных стадий Балтийского моря, унаследованных от нижележащих борозд выпаживания. В отличие от района погребенных плугмарков в северной части впадины, в колонках наблюдалась обратная закономерность в распределении значений МВ в озерных глинах в углублении и над бортом борозды. В колонке АБП-53082, отобранной в углублении борозды, заполненной анциловыми глинами наблюдались низкие значения МВ. В колонке АБП-53081, отобранной над бортом борозды, выявлена высокая МВ. При этом согласно литологическому описанию, в колонке АБП-53081 с повышенной МВ наблюдалось значительно меньше стяжений гидротроилита, чем в колонке АБП-53082. Полученные данные также соответствуют данным проведенной ранее магнитной съемки, однако причины низких значений магнитной восприимчивости в депрессиях плугмарков на северо-восточном склоне впадины пока не выяснены, необходимы дальнейшие литологические и геохимические исследования осадочных разрезов.

Финансирование

Экспедиционные исследования выполнены в рамках государственного задания ИО РАН, тема №FMWE-2021-0012. Геолого-геофизические исследования контурифта в Гданьской впадине выполнены по теме гранта Российского научного фонда № 22-17-00170 (<https://rscf.ru/project/22-17-00170/>).

Список литературы

1. Gelumauskaite L.-Z., Grigelis A., Cato I., Repecka M., Kjellin B. Bottom topography and sediment maps of the Central Baltic Sea. Scale 1:500,000 // Vilnius-Uppsala: LGT SERIES OF MARINE GEOLOGICALS MAPS No.1. – 1999. – № 54.
2. Dorokhov D. V., Dorokhova E. V., Sivkov V. V. Iceberg and ice-keel ploughmarks on the Gdansk-Gotland Sill (south-eastern Baltic Sea) // Geo-Marine Lett. – 2018. – V. 38 – № 1 – 83–94с.
3. Блажчишин А. И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море // Калининград: Янтарный сказ, 1998.

УДК 551.462.32

Рубрика 38.47.19

НОВЫЕ ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОДВОДНОГО БЕРЕГОВОГО СКЛОНА САМБИЙСКОГО П-ОВА В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ МНОГОЛУЧЕВОЙ ЭХОЛОТНОЙ СЪЁМКИ В 2021-2022 ГГ

NEW SEABED FEATURES OF THE SAMBIAN PENINSULA UNDERWATER SLOPE IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE BALTIC SEA, ACCORDING TO DETAILED MULTIBEAM BATHYMETRIC SURVEYS (2021–2022)

Дудков Иван Юрьевич^{1,2}, Дорохов Дмитрий Владимирович^{1,2}, Кондрашов Алексей Александрович¹

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

²*Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград*

Dudkov Ivan Yurievich^{1,2}, Dorokhov Dmitry Vladimirovich^{1,2}, Kondrashov Alexei Alexandrovich¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

Введение

Подводный береговой склон Самбийского п-ова в районе мыса Таран является уникальным местом в юго-восточной части Балтийского моря, где благодаря выходам на поверхность твердых коренных пород хорошо сохранились затопленные древние береговые уступы [1]. Террасированный подводный береговой склон на этом участке достаточно хорошо изучен [1-4]. Однако в настоящее время продолжают крупномасштабные геолого-геофизические исследования с использованием новейшего оборудования в этом уникальном районе для получения новых палеогеографических данных [5].

В ходе 47-49 рейсов НИС «Академик Борис Петров» (2021-2022 гг.) в районе м. Таран на некоторых участках были выполнены экспедиционные исследования (Рис. 1), включающие многолучевое эхолотирование, акустическое профилирование, отбор проб осадков и подводная видеосъемка морского дна [5]. Был получен колоссальный объем информации о батиметрии, морфологии и геологии морского дна (Рис. 1), который в совокупности с уже известными и описанными данными 47-го рейса НИС «Академик Николай Страх» [4] (Рис. 1) позволил выявить и описать новые геоморфологические особенности подводного берегового склона Самбийского п-ова в районе м. Таран.

Материалы и методы

Площадная батиметрическая съёмка выполнялась с использованием многолучевого эхолота (МЛЭ) Reason SeaBat T50-ER (частота 400 кГц, 1024 луча). Акустическое профилирование проводилось параметрическим профилографом Parasound P70 одновременно с многолучевым эхолотированием. Съёмка профилографом велась на двух частотах 4,5 кГц (в 49-м рейсе – 7 кГц) и 21,5 кГц с вертикальным разрешением около 10-20 см и глубиной до 30 м. Позиционирование судна, синхронизация времени и ввод поправок за перемещение судна

осуществлялось с помощью инерциальной навигационной системы Applanix POS MV. Для точного расчета глубин регулярно измерялся профиль скорости звука зондом Valeport MiniSVP.

Регистрация и постобработка данных МЛЭ осуществлялась в программном обеспечении (ПО) Teledyne PDS2000. Обработка и интерпретация данных акустического профилирования проводились в ПО RadExPro и Kingdom Software. Отбор проб осадков выполнялся дночерпателями Ван Вина и «Океан-50». Подводная видеосъемка проводилась цифровой камерой, помещенной в бокс, изготовленный в АО ИО РАН.

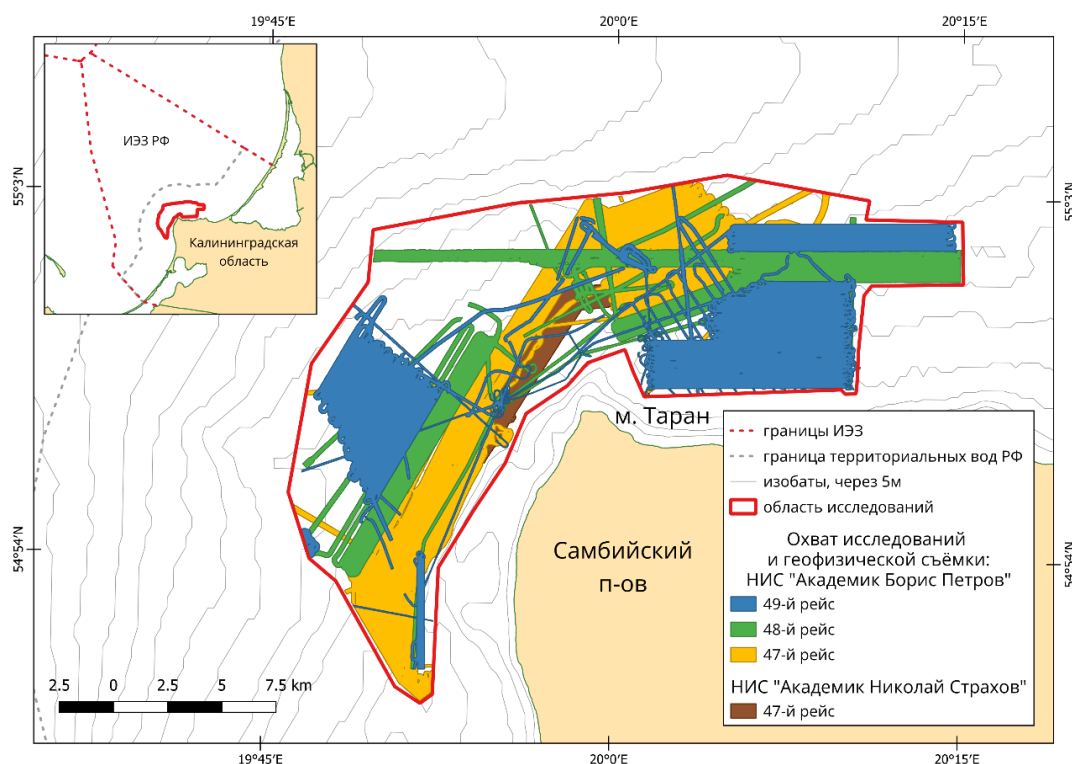


Рис. 1. Район исследования и обеспеченность материалами геофизической съёмки.

Полигонами указан охват данных многолучевого эхолотирования и акустического профилирования, выполненных в ходе экспедиционных исследований на НИС «Академик Борис Петров» в 2021-2022 гг. и НИС «Академик Николай Страхов» в 2019 г.

Результаты

В результате сбора и обработки геофизических данных получены детальные цифровые модели рельефа (ЦМР) с разрешением от 25 см до 1 м, мозаики обратного акустического рассеяния и сейсмоакустические профили верхнего слоя донных отложений. Модели рельефа были объединены в единую ЦМР (Рис. 2). Анализ и интерпретация полученных результатов позволили уточнить известные ранее [1-4] и выявить новые особенности микрорельефа дна подводного берегового склона в районе м. Таран.

Террасированный подводный береговой склон представлен уступами разной формы и генезиса. Они сформировались на разных стадиях Балтийского моря и были затоплены в ходе литориновой трансгрессии [4]. Продолжение детальной батиметрической съёмки позволило уточнить границы распространения изученных ранее наиболее крупных и крутых уступов с высотой до 7-9 м (Рис. 3), а также выявить ряд новых уступов высотой до 1-4 м (Рис. 4, 5).

Высокое разрешение многолучевой эхолотной съёмки позволило выявить волноприбойную нишу и карниз нависания на большинстве участков крупного уступа (Рис. 3, Б), что

доказывает его абразионное происхождение. В основании уступа отмечена валунно-глыбовая отмостка, которая сформировалась в результате обрушения карниза нависания и размыва моренных отложений (Рис. 3, Б). Часто на террасе у основания уступа встречаются линзы песков, которые также маркируют древние береговые уровни [4].

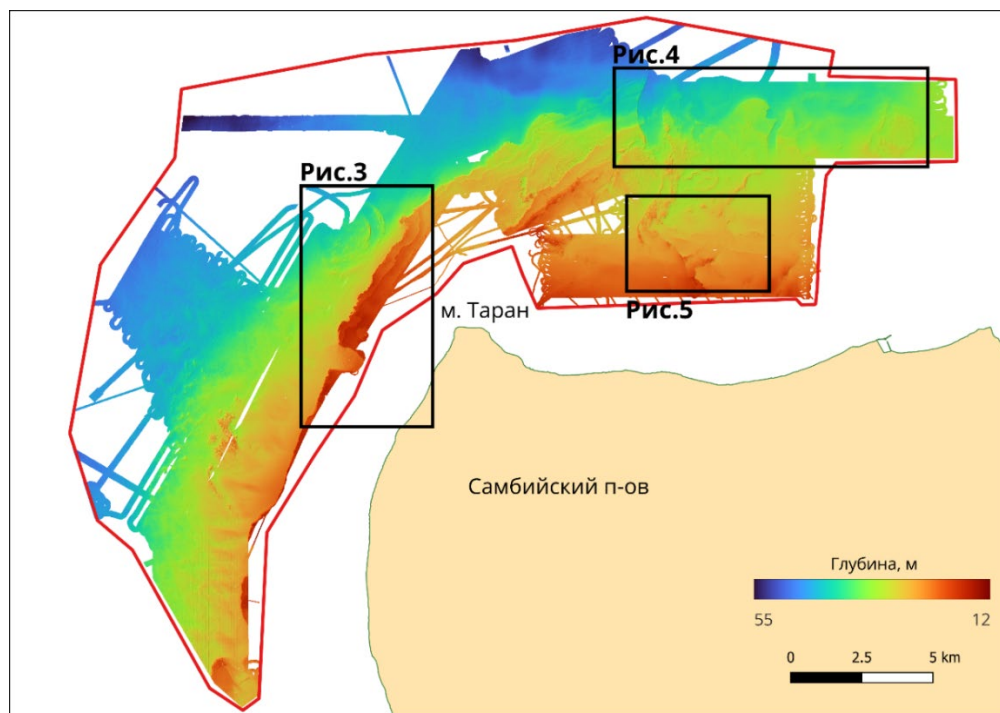


Рис. 2. Объединённая цифровая модель рельефа дна подводного берегового склона у м. Таран. Черными прямоугольниками показано расположение детальных участков, приведенных на соответствующих рисунках.

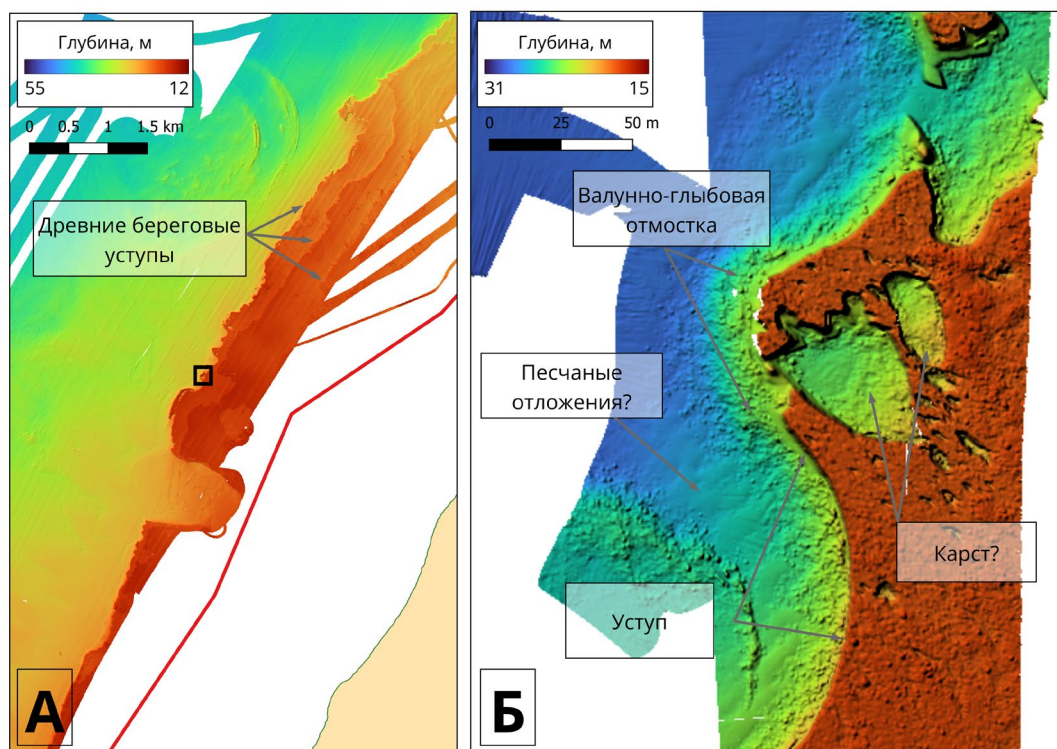


Рис. 3. Цифровая модель рельефа дна западной части подводного берегового склона у м. Таран. А – участок, на котором прослеживаются наиболее крупные древние береговые уступы; Б – детальный участок ЦМР, отмеченный на врезке А черным прямоугольником,

показывающий особенности морфологии подводного берегового склона в районе распространения палеоклифов.

Расширение района исследования позволило обнаружить серию хорошо выраженных в рельефе, а также погребенных палеодолин (Рис. 4). Они сильно варьируются по ширине, длине и глубине. Наиболее крупная долина (Рис. 4 Б, профиль I-II) характеризуется шириной до 1 км, длиной в пределах района исследования около 3 км, на глубинах от 30 до 46 м и обладает относительной глубиной до 8 м.

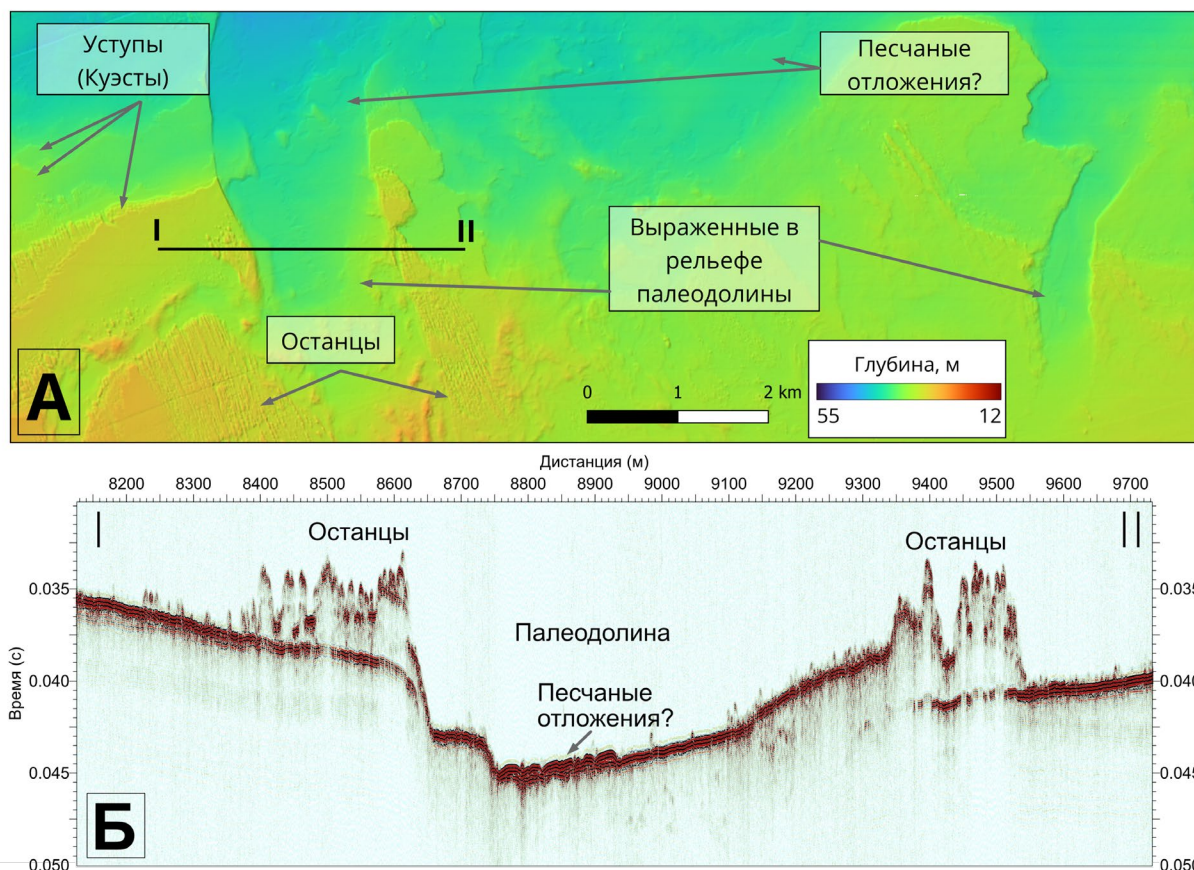


Рис. 4. Северо-западная часть подводного берегового склона у м. Таран. А – цифровая модель рельефа дна, представленного уступами, полями останцов и палеодолинами; Б – геофизический профиль I-II проходящий через наиболее крупную палеодолину.

На многих участках на глубинах от 15 м до 45 м встречаются крупные поля денудационных останцов (Рис. 4-5), вытянутых в северо-западном направлении. Их высота составляет около 1-4 метров, ширина до 10 м, длина до 70-90 м. Вероятно их генезис связан с ледниковой экзарацией.

В районе исследования также широко распространены крупные моренные образования с включениями валунов, имеющие линейное простирание (Рис. 5). Их размеры сильно варьируются и могут быть вытянуты до 1-2 км, шириной до 200-300 м и высотой от 2 м до 9 м.

Повсеместно на подводном береговом склоне встречаются маломощные, до 1 м, отложения мелкозернистого и/или алевритового песка (Рис. 3-5), часто простирающиеся от берега, которые вероятно формируются в результате размыва пляжа и выноса песка на глубину. Также встречаются поля, вероятно, среднезернистого песка, размер зёрен которого при распространённых здесь придонных течениях благоприятствует образованию ряби на

поверхности с высотой до 50 см и шириной до 1 м. Рябь как правило субперпендикулярна к направлению увеличения глубины и вероятно образуется в результате сильных компенсационных течений от берега в штормовой период. По той же причине образуются выявленные многочисленные промоины в полях мелкозернистых и алевритовых песков в северо-западной части подводного берегового склона м. Таран.

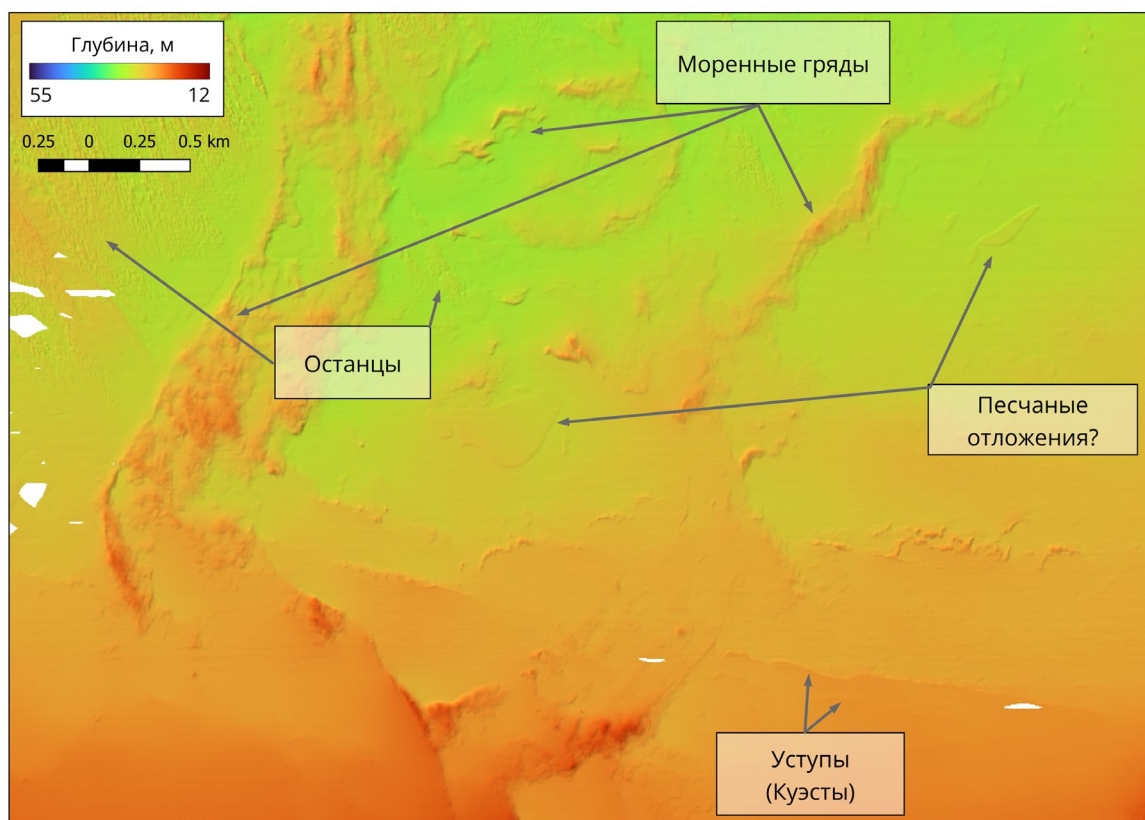


Рис. 5. Северо-западная, относительно мелководная часть подводного берегового склона в районе м. Таран, где широко распространены моренные образования.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2021-0012. Авторы благодарят компанию RADEXPRO SEISMIC SOFTWARE LCC за предоставленное программное обеспечение.

Список литературы

- 1) Блажчишин А. И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море // Калининград: Янтарный сказ. 1998. Т. 160.
- 2) Sivkov V., Dorokhov D., Ulyanova M. Submerged holocene wave-cut cliffs in the South-eastern part of the Baltic Sea: reinterpretation based on recent bathymetrical data // J. Harff et al. (eds.) The Baltic Sea Basin. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. - 2011. - pp. 203 - 217.
- 3) Дорохов Д.В., Дорохова Е.В. Литодинамические и геоморфологические особенности террасированного подводного склона Самбийского п-ова (юго-восточная часть Балтийского моря) // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта, 2014. – Вып. 1: Естественные науки. - с. 30-41
- 4) Dorokhov D.V., Lugovoy N.N., Dorokhova E.V., Budanov L.M., Dudkov I.Yu. Morphology and origin of the palaeo cliff area in the Sambia Peninsula nearshore (SE Baltic Sea) // Quaternary International. 2022. V. 630. P. 17–33. doi: 10.1016/j.quaint.2021.03.025

- 5) Dorokhov, D. V., Kondrashov, A. A., Bubnova, E. S., Ezhova, E. E., Bagirov, N. E., Dudkov, I. Y., ... & Lugovoy, N. N. Geological, Geophysical, and Geoecological Studies of the Southeastern Baltic Sea on Cruises 47–49 of the R/V Akademik Boris Petrov //Oceanology. – 2022. – T. 62. – №. 6. – C. 922-925.

УДК 911.52

Рубрика 39.19.29; 39.19.31

**КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НИЛЬМЕНСКО-ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ
ПРИУСТЬЕВОЙ МЕСТНОСТИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ**
**COMPREHENSIVE STUDIES OF THE NILMENSKAYA-CHERNORECHENSKAYA
ESTUARY AREA, KANDALAKSHA BAY, WHITE SEA**

**Токарев Михаил Юрьевич¹, Фрих-Хар Анна Юрьевна², Корост Светлана
Радиковна¹, Полудеткина Елена Николаевна¹, Рыбалко Александр Евменьевич^{2,3,4},
Терехина Яна Евгеньевна¹**

¹*МГУ имени М.В. Ломоносова,*

²*ЦМИ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва,*

³*ФГБУ «ВНИИОкеанология, Санкт-Петербург,*

⁴*Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург*

**Tokarev Mikhail Yurievich¹, Frikh-Khar Anna Yrievna², Korost Svetlana Radikovna¹,
Poludetkina Elena Nikolaevna¹, Rybalko Alexander Evmenievich^{2,3,4}, Terekhina Yana
Evgenievna¹**

¹*MSU named after. M.V. Lomonosov,*

²*LMSU MRC, Moscow,*

³*FGBU "VNIIOkeanologiya", St. Petersburg,*

⁴*Institute of Geosciences, St. Petersburg State University, St. Petersburg*

Введение

Сложность выполнения инженерно-экологических изысканий в Арктике обусловлена тремя основными факторами: проведением полевых работ в сложных гидрометеорологических условиях, малой изученностью природной среды обширных акваторий лицензионных участков недропользователей на арктическом шельфе Арктики, короткий сезон мореплавания (1). Указанные причины определяют высокую стоимость выполнения экологических наблюдений полевых работ и их низкую эффективность.

Решение вышеописанных задач требует разработки новых методик и подходов в части реализации инженерно-экологических изысканий, позволяющих безопасно и эффективно организовывать работы по картированию параметров природной среды при обустройстве и эксплуатации месторождений. При этом большую роль играет анализ и учёт опыта экологических исследований в арктических условиях, адаптация лучших практик, наработанных в ходе этих работ и оптимизации методики работ на неисследованном российском шельфе Арктики на их основе. Одной из основных задач инженерно-экологических изысканий на шельфе, согласно СП 504.1325800.2021, является изучение подводного ландшафта для последующего анализа и выявления потенциальных рисков строительства того или иного морского сооружения.

Целью исследований была апробация методики крупномасштабного картирования подводных ландшафтов арктического шельфа РФ на примере тестового полигона «Крестовые острова» в Кандалакшском заливе Белого моря.

Для достижения цели были выполнены следующие работы:

- проведение полевых исследований на тестовом полигоне Белого моря для апробации методики изысканий;
- сбор данных и формирование базы данных проекта;
- проведение обработки и лабораторных исследований полевых данных, анализа видеонаблюдений;
- создание карт и схем абиотических компонент ландшафта;
- подготовка рекомендаций по картографированию подводных ландшафтов для управления экологическими рисками при строительстве и эксплуатации сооружений на арктическом шельфе.

В работе использованы данные учебно-научных практик высшей школы инновационного бизнеса, геологического, биологического и физического факультетов МГУ имени М.В. Ломоносова на Беломорской Биостанции МГУ имени Н.А. Перцева.

Методика исследований

Среди обширного комплекса методов и методических подходов к изучению подводных ландшафтов и их картографированию, помимо традиционного отбора проб и видеонаблюдений, с большой эффективностью, используются МЛЭ, ГЛБО. Очевидным плюсом использования дистанционных методов для картографирования дна является высокая производительность методов.

В местах с резко меняющимися по направлению и величине элементами рельефа, характерных для прибрежных зон, преобладает мозаичное распределение ареалов компонент подводных ландшафтов. Состав и взаимное расположение абиотических компонент в них могут быть определены большим числом факторов. Характерные размеры элементов пространственной мозаики составляют в верхней части шельфа от 103 до 106 м² (2). Поэтому при ландшафтном районировании Нильменско-чернореченской приустьевой местности выделены 3 ранга (пространственных категории) рельефа. Собственно, тестовый участок площадью около 7 кв. км. относится к категории ландшафта 2-го порядка, согласно СП 502.1325800.2021, урочища (категории 3 порядка) – участки с однотипным генезисом и морфологией мезорельефа, предопределяющими сочетание однотипных компонент ландшафтов – фаций (категории 4-го порядка). Фация - элементарная единица ландшафта, структурная часть урочища. Фация обычно совпадает с одним элементом мезорельефа или характерным набором элементов микрорельефа. Для верификации результатов геоморфологического и литологического анализа была сформирована база данных с примерами исходных сонограмм с высоким разрешением (менее 0,5 м), дополненных характерными фрагментами (снимками) видеонаблюдений и описанием проб в 43 точках отбора. Комплексирование геоморфологического и литологического районирования с подводными видеонаблюдениями позволило идентифицировать шесть фаций подводного ландшафта тестового полигона. Пример набора данных для описания фации приведен на Рис. 1.

Точка 2021-1 x (УТМ 36N) 506118,7589; y (УТМ 36N) 7378013,12026; H ≈ 17 м; Vmax _ см/с

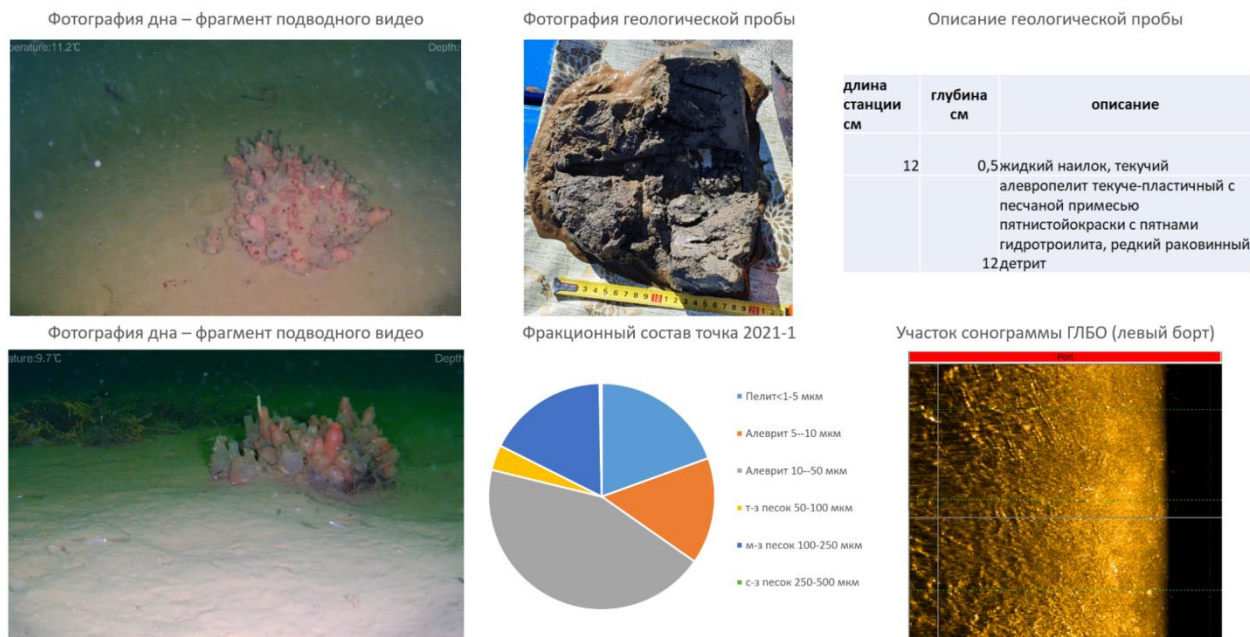


Рисунок 1. Данные для точки 1. Фация - полого-холмистая денудационно-аккумулятивная равнина.

Результаты.

В пределах полигона выделены четыре урочища – уплощенных структурных ступеней, занятых равнинами и склонами разного генезиса Рис. 2, размерами - первые километры по простиранию и сотни метров по ширине.

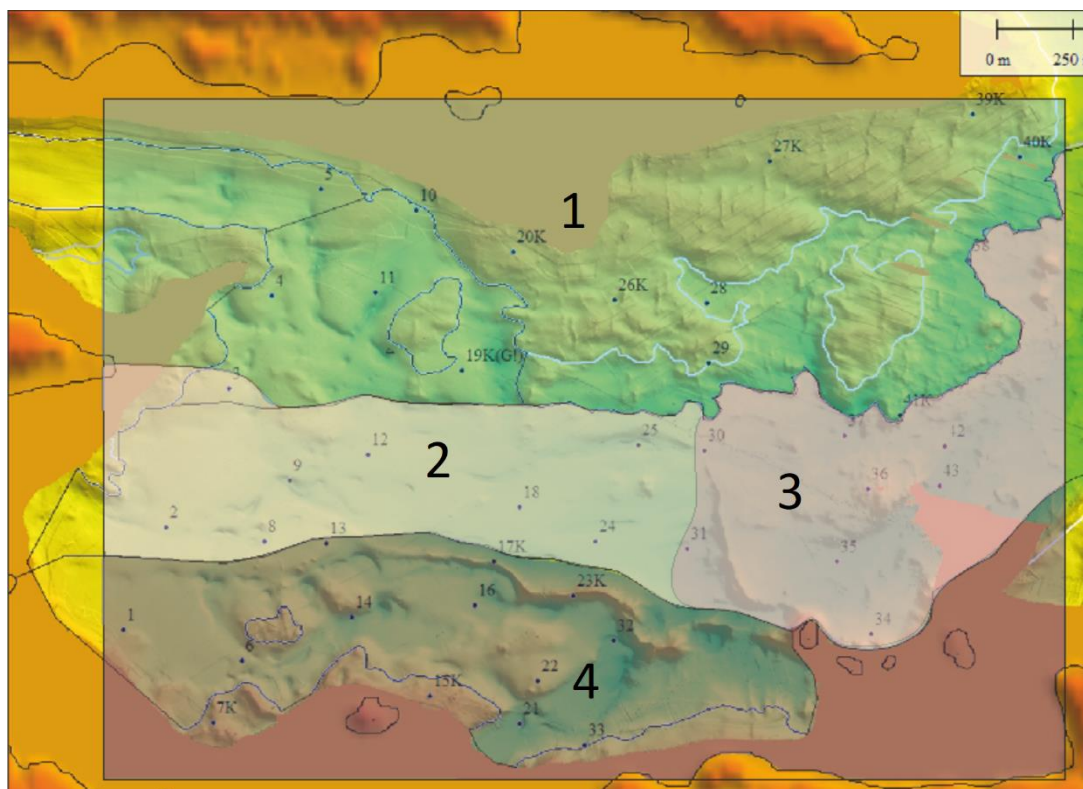


Рисунок 2. Карта-схема расположения урочищ нильменско-чернореченской приустьевой местности: 1 – «Северное», 2 – «Западное», 3 – «Восточное», 4 – «Южное».

Каждое из них характеризуется определенным набором морфологических признаков, особенностями строения фундамента, ледниковых и морских отложений, в том числе современных донных осадков, современных геологических процессов, моделирующих поверхность дна. Приоритет в характеристике урочищ отдан ведущему фактору, определившему современный облик рельефа. Четыре урочища, морфология и морфометрия рельефа которых (при однотипном генезисе) разнообразна, сложены фациями - участками с однотипным генезисом и морфологией мезо- и микрорельефа. Совмещение на картах детальных участков категорий двух разных порядков связано с целесообразностью для задач выделения подводных ландшафтов. Так, на участках структурно-денудационного и ледникового рельефа значимые – потенциально определяющие смену донных ландшафтов, различия состава поверхностных отложений уклонов дна выявлены на вершинных поверхностях гряд, склонах и днищах впадин, ложбин и котловин (элементы мезо-, а иногда - микрорельефа). А в пределах морских аккумулятивных равнин однотипные ландшафты могут занимать разные формы рельефа.

Привлечение данных об интенсивности придонных течений, полученных в результате полевых наблюдений в рамках данной работы, позволило оценить влияние гидрометеорологической компоненты на формирование подводного ландшафта тестового полигона.

Комплексный анализ данных МЛЭ, ГЛБО, АПр, геологического пробоотбора, подводных видео- и гидрометеорологических наблюдений позволяет характеризовать абиотическую компоненту подводного ландшафта нильменско-чернореченской местности следующим образом:

Северное урочище представлено прибрежной аккумулятивно-денудационной грядово-ложбинной наклонной равниной с пассивным гидродинамическим режимом.

Западное урочище представлено аккумулятивной флювиальной равниной активных стоковых течений.

Восточное урочище – холмистой аккумулятивно-денудационной равниной, осложненной структурно обусловленными ложбинами с активным гидродинамическим режимом.

Южное урочище – прибрежной холмисто-западной денудационно-аккумулятивной равниной с вихревыми течениями.

Заключение

В результате проведенной апробации методики крупномасштабного картирования для изучения подводных ландшафтов, в рамках инженерно-экологических изысканий на акваториях, рекомендуется выполнять следующие этапы исследований:

- Изучение результатов исследований прежних лет и сбор информации из открытых источников. Особенно важно для изучения биотической компоненты, требующий больших временных затрат на анализ проб.
- Планирование и проведение полевых исследований дистанционными геофизическими методами. Необходимо совершенствовать технологии одновременного сбора данных различными методами для сокращения сроков полевых работ и уменьшения планового разброса точек наблюдений. Опыт показал возможность одновременного проведения гидроакустических и сейсмоакустических исследований. Желательно дополнить комплекс буксируемым видеоблоком и проточным измерителем гидрохимических показателей.

- Предварительная (наборная) обработка и анализ данных дистанционных исследований для определения «ключевых участков» и оптимальных точек прямых наблюдений. Отсутствие оперативной обработки данных не позволило провести повторные наблюдения на профилях с низким качеством данных и скорректировать положение точек отбора проб в рамках одного полевого сезона.
- Выбор точек прямых наблюдений и проведение видеонаблюдений, гидрологических исследований и отбора проб в заданных точках. Необходимо дополнить протокол стандартных наблюдений требованиями к видеонаблюдениям для изучения ландшафтов и выработать стандарт измерения придонных течений, важного параметра, влияющего на литодинамические процессы.
- Комплексирование результатов гидрологических исследований, подводных фото- и видеонаблюдений, пробоотбора и лабораторных испытаний с данными дистанционных наблюдений для определения компонент подводных ландшафтов и их картирования. Необходимо продолжить формирование модели данных абиотических компонент и разработать рекомендации по формированию баз данных подводных ландшафтов. Объемы данных и их разнообразие показали необходимость дополнения экспертного анализа средствами геостатистического анализа с привлечением «искусственного интеллекта», «машинного обучения», «компьютерного зрения» и т.д., особенно для анализа биотической компоненты видеоряда.

Планирование полевых работ дистанционными методами должно осуществляться на основании собранной априорной информации о районе работ. В программе работ должен быть обоснован выбор параметров полевых наблюдений каждого геофизического метода (частотного диапазона гидро- и сейсмоакустических исследований, интенсивности излучения, способа буксировки и т.д.) и определена сетка наблюдения (шаг по профилю, азимут, расстояние между профилями, количество секущих и др.). Проведение полевых инженерно-геофизических наблюдений и отбор проб необходимо выполнять в соответствии с СП 504.1325800.2021. Желательно предусмотреть дополнительные детальные геофизические исследования на «ключевых участках».

При предварительной обработке и интерпретации данных дистанционных исследований для определения «ключевых участков» и оптимальных точек прямых наблюдений следует применять качественные и количественные способы анализа данных. «Ключевые участки» должны охватывать все характерные для исследуемой территории формы рельефа, учитывать разнообразие геологического строения, литологического состава донных отложений, гидрологического режима и разнообразия биоты. Число и сетку точек отбора проб, видеонаблюдений и гидрологических исследований на участках картирования следует устанавливать в зависимости от задач, масштаба исследований и типов ландшафта. Для проведенных исследований 4-5 точек на км.кв. представляется достаточным. В менее разнообразных условиях плотность прямых видеонаблюдений может быть уменьшена до 8-10 точек на предполагаемый ландшафтный выдел третьего уровня (урочища), но с обязательным получением не менее 3-х наблюдений на ландшафтную фацию.

Для идентификации элементов компонент подводных ландшафтов и их картирования следует проводить комплексирование результатов гидрологических исследований, подводных фото- и видеонаблюдений, пробоотбора и лабораторных испытаний с данными дистанционных наблюдений. Комплексирование основано на дополнении и детализации информации при последовательном анализе компонент природной среды. Предлагаемый состав и последовательность работ при картографировании абиотических компонент подводных ландшафтов включает в себя следующие действия:

- Изучение геологического строения по данным сейсмоакустических наблюдений;

- Анализ данных МЛЭ для выделения геоморфологических элементов мезо- и микрорельефа;
- Интерпретация данных акустического профилирования и гидролокации бокового обзора для определения типов донных осадков и изучения литодинамических процессов;
- Определение гидрологического режима района исследований;
- Комплексирование результатов подводных фото- и видеонаблюдений, пробоотбора и лабораторных испытаний с данными дистанционных наблюдений для определения абиотических компонент подводных ландшафтов;
- Построение абиотической основы подводного ландшафта;
- Анализ биоты в пределах ландшафтных выделов;
- Картографирование ландшафта.

В результаты исследований для картирования подводных ландшафтов могут входить:

- характеристика ландшафтной структуры территории;
- описание распространения типов ландшафтов по площади исследования;
- каталог факторов воздействия на ландшафты, в том числе антропогенных;
- предварительный прогноз развития ландшафтов, преобразуемых под воздействием хозяйственной деятельности, оценку их устойчивости к антропогенному воздействию.

Благодарность

Авторы благодарят сотрудников Беломорской биологической станции МГУ имени Н.А. Перцова за помощь в организации и проведении полевых исследований.

Проект выполнен при использовании оборудования Центра Коллективного Пользования (ЦКП) учебно-научного оборудования «Морская биология и геология» на Беломорской биологической станции МГУ имени Н.А. Перцова.

Список литературы

1. Виноградов Р.А., Андреев О.М., Бузин И.В., Гудошников Ю.П., Нестеров А.В, Новиков С.А., Наумов А.К., Смирнов К.Г., Скутина Е.А., Скутин А.А. Роль инженерно-гидрометеорологических и ледовых изысканий ААНИИ в обеспечении стабильного освоения шельфа Российской Арктики// «Neftegaz.RU» 2021 No2 [Электронный ресурс] <https://magazine.neftgaz.ru/articles/arktika/667236-rol-inzhenerno-gidrometeorologicheskikh-i-ledovykh-izyskaniy-aanii-v-obespechenii-stabilnogo-osvoeni/>
2. СП 504.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования.
3. Мокиевский В.О. Экология морского мейобентоса. М., КМК. 2009. 286 с.

УДК 502.75:581.526.323(262.5)

Рубрика 39.19.31

МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ПОДВОДНЫХ ЛАНДШАФТОВ БУХТЫ ЛАСПИ

(Г. СЕВАСТОПОЛЬ)

LONG-TERM DYNAMICS OF UNDERWATER LANDSCAPES OF THE LASPY BAY
(SEBASTOPOL)

Панкеева Татьяна Викторовна¹, Миронова Наталия Всеволодовна²

^{1,2}Федеральный исследовательский центр "Институт биологии южных морей

имени А.О. Ковалевского РАН", г. Севастополь, Российская Федерация

Pankeeva Tatyana Viktorovna¹, Mironova Nataliya Vsevolodovna²

^{1,2}Kovalevsky Institute of Marine Biological Research RAS, Sevastopol, Russian Federation

Введение

В настоящее время использование ландшафтного подхода к изучению морских геосистем вызывает научный интерес, широко обсуждается и приобретает научно-практическую значимость. Однако, научных работ, посвящённых изучению многолетней динамики подводных ландшафтов, незначительное количество, ввиду ограниченного опыта подобных исследований, отсутствия методологических основ и накопленного массива данных. В связи с этим, исследование пространственно-временных изменений подводных ландшафтов является актуальной задачей географической науки.

В качестве модельного полигона для исследования многолетней динамики ландшафтной структуры выбрана бухта Ласпи (г. Севастополь), где имеется ряд многолетних наблюдений. В акватории бухты в составе донной растительности ключевые виды водорослей представлены ерикарией косматой (*Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry = *Cystoseira crinita*), гонголарией бородатой (*Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze = *Cystoseira barbata*), филлофорой курчавой (*Phyllophora crispa* (Huds.) P.S. Dixon), взморником морским (*Zostera marina* L) и взморником Нольта (*Zostera noltei* Hornem), которые обладают охранным статусом, как на государственном, так и международном уровнях. На современном этапе береговая зона бухты активно используется для развития рекреационной деятельности, что приводит к сокращению её ландшафтного и биологического разнообразия.

Цель статьи заключается в изучении пространственно-временных изменений ландшафтной структуры прибрежной зоны бухты Ласпи за более чем 40-летний период (1983–2016 гг.).

Данные и методы

Для изучения многолетней динамики подводных ландшафтов использовали материалы четырех экспедиций, проведенных в бухте Ласпи летом в 1983, 1998, 2008 и 2016 гг. Работы в акватории выполняли с маломерных судов с применением лёгководолазного снаряжения. При изучении структуры ландшафтов дна использовали метод ландшафтного профилирования с детальным описанием ключевых участков. В бухте заложены четыре

профиля, которые расположены перпендикулярно к берегу и охватывали все типы ландшафтов. Для изучения состава макрофитобентоса использованы материалы гидробиологических съёмок, проведённых на тех же профилях. Отбор проб проводили по общепринятой методике [Калугина-Гутник, 1975]. На глубинах 0,5; 1; 3; 5; 10 и 15 м закладывали по четыре учётные площадки размером 25x25 см. Идентификацию водорослей проводили по определителю [Зинова, 1967] с учётом последних номенклатурных изменений [Guiry and Guiry, 2023]. Выделение фитоценозов осуществляли согласно доминантной классификации по А. А. Калугиной-Гутник [Калугина-Гутник, 1975]. Ландшафтное картографирование на основе системы профилей, пересекающих акваторию, позволило выделить подводные ландшафты, установить их границы. Для создания ландшафтной карты использовали программный пакет *QGIS 2.18.17* и электронную основу навигационной карты. Географическую привязку границ ландшафтов осуществляли с помощью программы *QGIS*. Сопряженный анализ батиграфии, карт литологического состава и данных водолазных съёмок позволили провести экстраполяцию участков дна со сходными параметрами для выделения границ ландшафтов [Pankeeva, Mironova, 2019].

Результаты

Проведённые исследования по изучению многолетней динамики подводных ландшафтов бухты Ласпи за более чем 40-летний период выявили, что, несмотря на произошедшие изменения в ландшафтообразующих факторах, в прибрежной зоне сохраняется ландшафтный «каркас», где доминируют ландшафты с ключевыми видами макрофитов. Для ландшафтной структуры бухты, как показал сравнительный анализ за период с 1983 по 2016 гг., характерны четыре подводных ландшафта с участием доминирующих видов макрофитобентоса (*Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Phyllophora crispa*, *Zostera Noltei* и *Zostera marina*). Эти виды были зарегистрированы в течение длительного периода наблюдений [Панкеева, Миронова, 2019]. Однако, за изучаемый период произошло резкое сокращение площади их распространения, изменилась конфигурация границ подводных ландшафтов, при этом отмечено значительное снижение количественных показателей растительной компоненты.

1. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют ерикария косматая и гонголария бородатая, выделяли вдоль побережья бухты более 40 лет. Однако, глубина распространения и площадь этого ландшафта варьировали по годам (рис. 1). Так, если в 1983 и 1998 гг. он занимал глубину 0,5–10 м, в 2008 г. был зафиксирован на глубине 0,5–15 м, то в 2016 г. – встречался лишь на глубине 0,5–5 м. В настоящее время его площадь сократилась почти вдвое. Показательно, что за исследуемый период на этом ландшафте произошло увеличение общей биомассы макрофитов, хотя доля участия *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata* снизилась. Характерно, что здесь стали регистрировать зеленые виды водорослей, возросла роль эпифитных синузий, что свидетельствует о возрастании степени эвтрофирования водной среды.

2. Подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где господствуют ерикария косматая и гонголария бородатая, с мозаично чередующимися галечно-гравийными с битой ракушей осадками, на которых преобладает филлофора курчавая, описан в течение всего периода наблюдений, за исключением 1998 г., когда этот ландшафт не был обнаружен. Глубина распространения и его площадь также существенно изменялись по годам (рис. 1). Характерно, что как в 1983 г., так и в 2008 г., он был зафиксирован на глубине 10–15 м, тогда как в 2016 г. границы ландшафта сместились ближе к берегу (5–10 м). В 1983 г. его площадь

га	1 – подводный склон, сложенный грубообломочными отложениями, где доминируют ерикария косматая и гонголария
----	--

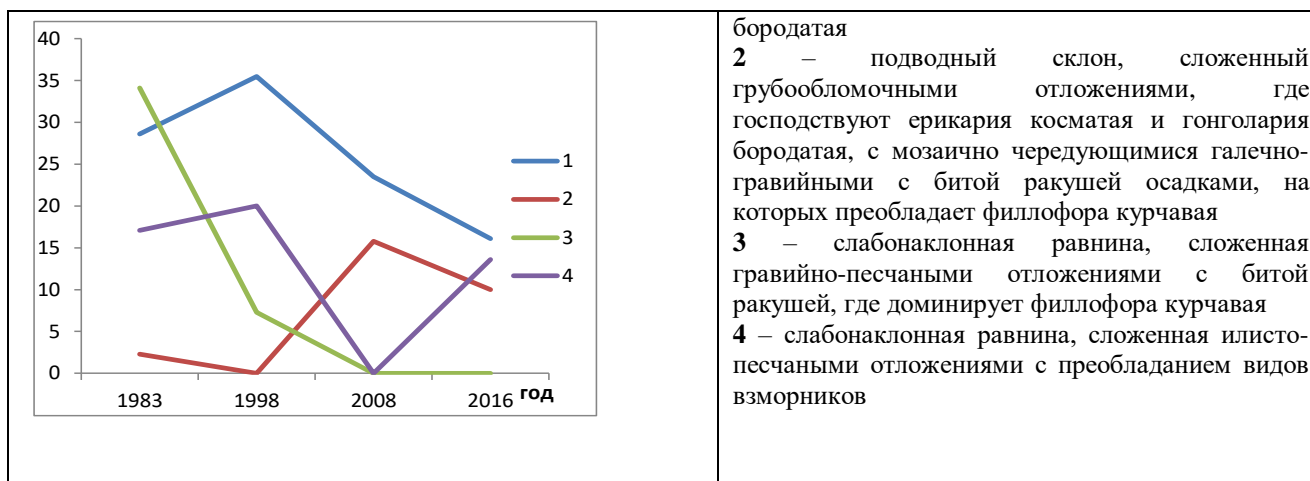


Рисунок 1 – Изменение площади подводных ландшафтов в бухте Ласпи по годам

была наименьшей (рис. 1). Затем в последующие года (2008 и 2016 гг.) показатели площади значительно возросли, хотя, общая биомасса макрофитов незначительно снизилась. В целом, этот ландшафт, также как и предыдущий, характеризуется высокими значениями биомассы макрофитов, при этом, доля, входящих в их состав доминирующих *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata* и *Phyllophora crispa*, существенно снизилась, а вклад эпифитирующих видов водорослей – значительно увеличился.

3. Слабонаклонную равнину, сложенную гравийно-песчаными с битой ракушей отложениями, где доминирует филлофора курчавая, регистрировали только в 1983 и 1998 гг. За этот период площадь этого ландшафта уменьшилась примерно в 5 раз, хотя границы его распространения не изменились (рис. 1). Однако, если в 1983 г. он простирался вдоль всей бухты на глубине 10–20 м, то в 1998 г. – сохранился на этих же глубинах лишь в восточной и юго-восточной её части. В 1983 г. для ландшафта были характерны высокие количественные показатели биомассы эдификатора и низкий уровень развития эпифитов, тогда как в 1998 г. отмечено резкое снижение биомассы филлофоры, которое сопровождалось массовым появлением сопутствующих видов. В 2008 и 2016 гг. на его площади, вместо зарослей *Phyllophora crispa* сформировалось сильно деградированное разреженное сообщество макрофитов, где доминировали виды кладофоры, что, вероятно, также связано с увеличением уровня загрязнения воды и уменьшением её прозрачности.

4. Слабонаклонная равнина, сложенная илисто-песчаными отложениями, с преобладанием видов взморников, зафиксирована в 1983, 1998 и 2016 гг. В 2008 г. этот ландшафт не был зарегистрирован. За исследуемый период он также значительно изменял границы контура и глубину простирания. В 1983 г. ландшафт занимал центральную часть бухты на глубине от 5 до 10 м, через 15 лет был распространен в центральной и северо-западной части бухты на глубине 10–15 м. Его площадь незначительно увеличилась (рис. 1), хотя биомасса морских трав снизилась в 4–5 раз. В 2016 г. ландшафт был описан на тех же участках бухты и на той же глубине, что и в 1998 г., хотя за 18 лет его площадь уменьшилась в 1,5 раза. Для него характерны невысокие значения биомассы макрофитов, где основной вклад в их общую биомассу вносит *Zostera marina*.

Проведенные исследования по изучению многолетней динамики подводных ландшафтов бухты Ласпи за более 40-летний период показали, что сохраняется ландшафтный «каркас», где доминируют ландшафты с ключевыми видами донной растительности *Ericaria crinita*, *Gongolaria barbata*, *Phyllophora crispa*, *Zostera marina* и *Zostera Noltei*. Тем не менее, за исследуемый период произошло резкое сокращение площади распространения и конфигурации подводных ландшафтов с преобладанием ключевых видов донной

растительности. Показано, что существенные изменения произошли в качественных и количественных показателях растительной компоненты подводных ландшафтов. Выявлено, что наименьшие пространственно-временные изменения произошли в ландшафте подводного склона, сложенного грубообломочными отложениями, с доминированием видов ерикарии косматой и гонголарии бородатой. Наиболее выраженные отрицательные изменения отмечены в центральной части бухты на слабонаклонной равнине, сложенной илисто-песчаными и песчаными отложениями с битой ракушей с взморниковым и филлофоровым фитоценозами.

Заключение

Впервые приведены сведения по многолетней динамике подводных ландшафтов бухты Ласпи за период с 1983 по 2016 гг. Показано, что за исследуемый период в акватории бухты Ласпи произошла существенная перестройка ландшафтной структуры, что, вероятно, связано с влиянием как природных факторов, так и возросшей антропогенной деятельностью.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме № гос. регистрации 121030300149-0.

Список литературы

1. *Зинова А. Д.* Определитель зеленых, бурых и красных водорослей южных морей СССР. М.: Наука, 1967. 400 с.
2. *Калугина-Гутник А.А.* Фитобентос Черного моря. Киев: Наук. думка, 1975. 248 с.
3. *Панкеева Т.В., Миронова Н.В.* Запасы макрофитов как показатель состояния подводных ландшафтов (Чёрное море) // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2019 – № 6 – С. 102–112.
3. *Guiry M. D., Guiry G. M.* AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. URL. – 2023. [www:algaebase.org](http://www.algaebase.org) (date accessed: 21.08.2023).
4. *Pankeeva T.V., Mironova N.V.* Spatiotemporal Changes in the Macrophytobenthos of Laspi Bay (Crimea, Black Sea) // *Oceanology*, 2019. - Vol. 59, iss. 1. - P. 86–98. DOI: 10.1134/S0001437019010168.

УДК 551.462.32

Рубрика 38.47.19

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ МОРСКОГО ГАЗОВОГО
ТЕРМИНАЛА КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

GEOLOGICAL AND GEOPHYSICAL RESEARCH IN THE AREA OF THE OFFSHORE
GAS TERMINAL OF THE KALININGRAD REGION

**Меркурьева Виктория Михайловна^{1,2}, Дорохов Дмитрий Владимирович^{1,2},
Дорохова Евгения Валерьевна^{1,2}, Наумов Илья Александрович^{1,2}**

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

² *Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград*

**Merkurieva Viktoria Mikhailovna^{1,2}, Dorokhov Dmitry Vladimirovich^{1,2}, Dorokhova
Evgenia Valerievna^{1,2}, Naumov Ilya Alexandrovich^{1,2}**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

Введение

В 47-ом и 49-ом рейсах Атлантического отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова, в сентябре 2021 и июне 2022 годов, были проведены исследования рельефа дна в российском секторе юго-восточной части Балтийского моря (рис. 1). Исследуемый участок характеризуется сложным, слабоизученным рельефом, также представляющим интерес для оценки влияния антропогенной деятельности на морское дно, поскольку находится в непосредственной близости к новому терминалу по приёму, хранению и регазификации сжиженного природного газа ООО «Газпром ПХГ».

Основной целью работы являлось получение новых данных о рельефе дна и донных отложениях в районе обустройства терминала для изучения палеоформ, уточнения карты типов поверхностных осадков и предварительной оценки антропогенного воздействия на дно.



Рис. 1. Схема работ

Данные и методы исследования

В ходе экспедиционных работ выполнены геофизические исследования и отбор проб поверхностных осадков. Батиметрическая съёмка выполнялась с использованием штатного судового многолучевого эхолота (МЛЭ) Reason SeaBat T50-ER (частота 400 кГц, 1024 луча), что позволило впервые получить цифровую модель рельефа дна высокого разрешения в этом районе. Регистрация и обработка данных МЛЭ проводились в программном обеспечении (ПО) Teledyne PDS 2000.

Также использовались данные обратного рассеяния МЛЭ. Классификация полученной мозаики обратного рассеивания (рис. 2) выполнялась при помощи ПО QGIS, а также Semi-Automatic Classification Plugin [1]. Контролируемая классификация (также известная как полуавтоматическая классификация) – это метод, предназначенный для обработки данных дистанционного зондирования и классификации растительного покрова путем обучения алгоритма с использованием спектральных сигнатур материала. Для литологической интерпретации полученных классов субстрата использовалась имеющаяся в АО ИО РАН карта типов осадков [2]. Для определения типов осадков дополнительно использовались данные гранулометрического анализа донных отложений, отобранных в экспедициях АО ИО РАН в 2006-2022 гг.

Сейсмоакустическое профилирование донных отложений выполнялось штатным судовым параметрическим профилографом Parasound P70 (высокая частота 21 кГц, низкая – 4,5 кГц). Регистрация данных профилографа выполнялась в штатном ПО Parastore, а обработка и визуализация профилей – в программе RadExPro.

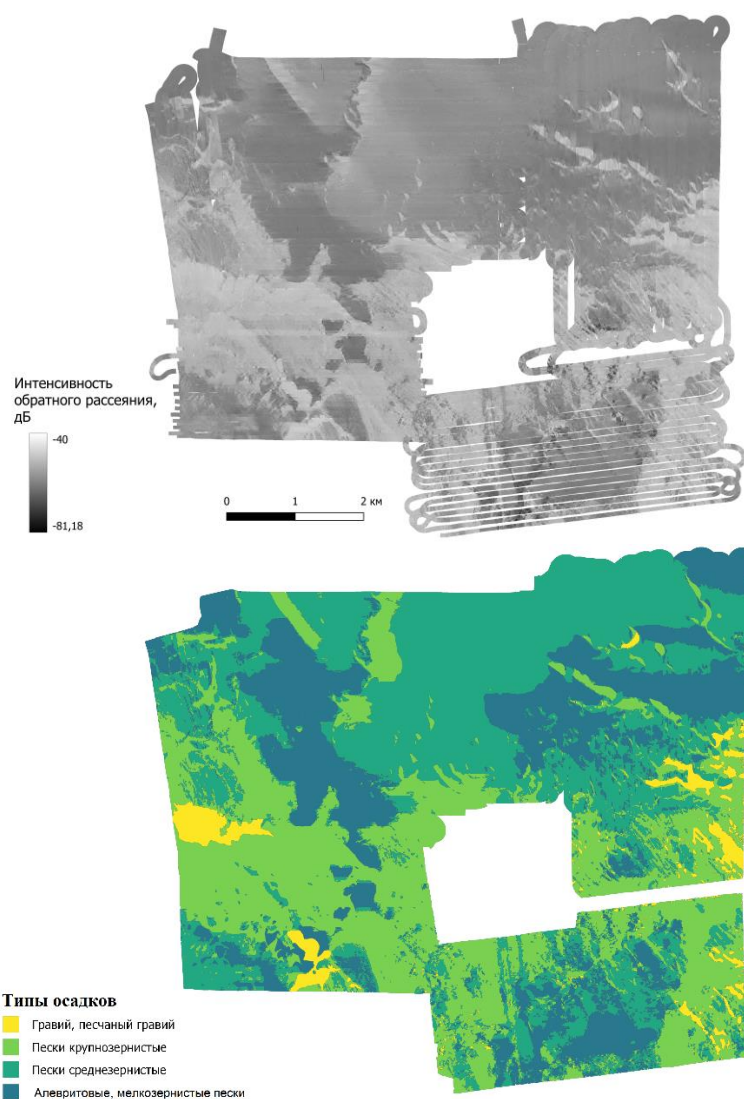


Рис. 2. Мозаика обратного рассеяния (сверху) и предварительные результаты её классификации (снизу)

Результаты

Подводный береговой склон в юго-западной и западной части района исследования характеризуется террасированной поверхностью, обусловленной выходами дочетвертичных образований. Такие абразионные поверхности преобладают по внешнему краю Самбийско-Куршского выступа суши [3] и являются уникальным образованием в Юго-Восточной Балтике. Уступ на глубинах 24-28 м является древним клифом, образованным на стадии Анцилового озера около 10 тыс. лет назад. На глубинах 14-16 м и 20-24 м уступы сформировались в ходе литориновой трансгрессии в результате избирательной денудации моноклинально залегающих палеогеновых пород с образованием куэстового рельефа [4]. В северо-западной части района исследования на глубинах 24-28 м выявлены вытянутые с юга на север останцы высотой около 1 м, длиной до 70 м и шириной 2-12 м. Вероятно они образованы под воздействием ледовой экзарации. Террасированный склон и вся часть района исследования на глубинах около 15-25 м покрыта песчаным гравием и крупнозернистыми песками, которые являются реликтовыми и сформировались в ходе длительного положения уровня моря в Литориновую и пост-Литориновую стадии Балтийского моря [5]. Благодаря придонным течениям они не покрыты современными осадками.

В юго-восточной части района исследования холмисто-грядовый рельеф обусловлен отложениями морены. В понижениях между грядами на поверхности дна выявлены мелкозернистые и алевритовые пески, вероятно, образованные в результате размыва пляжа и моренных отложений на подводном береговом склоне. В южной и восточной части полигона наблюдается чередование песков различной размерности в виде вытянутых с юго-востока на северо-запад полей, которые также зачастую отражены в рельефе. Вероятно, они маркируют ложбины стока компенсационных течений. Северная часть полигона представлена полого-наклонной равниной с глубинами от 25 до 30 м. Здесь отмечаются аккумулятивные образования среднезернистых, мелкозернистых и алевритовых песков.

В южной части района исследования выявлены несколько траншей по направлению от терминала СПГ до берега, по которым проложены коммуникации. На глубинах менее 16 м они практически перестают прослеживаться, т.к. занесены песчаными наносами. В восточной части полигона четко прослеживается трубопровод от нефтедобывающей платформы Дб, который также скрывается на некоторых участках под слоем мелкозернистых песков, что указывает на их современное происхождение. На севере района исследования обнаружены линейные борозды выпаживания глубиной несколько сантиметров и шириной от 2 до 60 м, которые предположительно оставлены техникой при строительстве терминала.

Выводы

Таким образом, в районе исследования выявлен расчлененный рельеф, связанный в первую очередь с выходами дочетвертичных пород и моренными отложениями. Полученная новая карта поверхностных осадков показала более мозаичное их распределение по сравнению с имеющимися ранее данными [2]. Выявлены следы техногенного воздействия на дно.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема № FMWE-2021-0012. Авторы благодарят компанию RADEXPRO SEISMIC SOFTWARE LLC за предоставленное программное обеспечение.

Список литературы:

1. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS // *Journal of Open Source Software*. 2021. Т. 6. №. 64. С. 3172.
2. Дорохова Е.В., Дорохов Д.В. Литодинамика и распределение осадков на подводном береговом склоне Самбийского полуострова и Куршской косы (юго-восточная Балтика) // *Моря России: исследования береговой и шельфовой зон / Тезисы докладов всероссийской научной конференции*. г. Севастополь, 21–25 сентября 2020 г. С. 274-275.
3. Блажчишин А. И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море // Калининград: Янтарный сказ. 1998. Т. 160.
4. Dorokhov D.V., Lugovoy N.N., Dorokhova E.V., Budanov L.M., Dudkov I.Yu. Morphology and origin of the palaeo cliff area in the Sambia Peninsula nearshore (SE Baltic Sea) // *Quaternary International*. 2022. V. 630. P. 17–33. doi: 10.1016/j.quaint.2021.03.025
5. Дорохов Д.В., Дорохова Е.В., Дудков И.Ю. Особенности формирования рельефа дна и четвертичных отложений юго-восточной Балтики в условиях глобального изменения климата // Тезисы докладов всероссийской научной конференции «Моря России: исследования береговой и шельфовой зон» (г. Севастополь, 21–25 сентября 2020 г.). Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2020. С. 268–270.

УДК 911.52

Рубрика 39.19.29

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ФОРМИРОВАНИЮ ДЮН НА ПОДВОДНОМ БЕРЕГОВОМ СКЛОНЕ КУРШСКОЙ КОСЫ

NEW DATA ON THE FORMATION OF DUNES ON THE UNDERWATER COASTAL SLOPE OF THE CURONIAN SPIT

Орлов Евгений Константинович^{1,2}, Дорохов Дмитрий Владимирович^{1,2}

¹ Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград

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

Orlov Evgeniy Konstantinovich^{1,2}, Dorokhov Dmitriy Vladimirovich^{1,2}

¹ Immanuel Kant Baltic federal university, Kaliningrad

² Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Введение

Балтийское море – относительно молодой водный бассейн с динамичной историей развития. Главным фактором динамики была деградация Скандинавского ледника, которая началась в Юго-Восточной Балтике около 16 тысяч лет назад. Эвстатическое колебание уровня и гляциоизостатическое поднятие определяли береговую линию, которая на протяжении всей истории моря меняла свое положение в значительных пределах [1]. В позднеледниковый период Юго-Восточная Балтика занимала более выдвинутое в море положение. На определенном этапе развития, в стадию Литоринового моря (9-5 тыс. лет назад), трансгрессия моря захватывала участки суши и под водой оказались древние уступы и террасы, которые были сформированы абразионными процессами во времена стабилизации уровня. На перекрытых морем участках прежней суши на плато Рыбачий (подводный береговой склон Куршской косы) обнаруживаются волнистые песчаные поля, которые, как считается, являются реликтовыми подводными дюнами и имеют эоловый морфогенез [2]. Однако, по современным представлениям скорость подъема уровня моря в литориновую стадию была менее 1 метра за каждые 100 лет [3]. Можно предположить, что подобные условия трансгрессии должны были способствовать размыву дюн волновыми процессами. Таким образом, целью данной работы является предварительный анализ экспедиционных данных геоморфологического мониторинга подводного берегового склона Куршской косы для уточнения генезиса подводных дюн.

Данные и методы

В 2021-2023 гг. ИО РАН совместно с БФУ им. И. Канта были проведены три экспедиции в юго-восточной части Балтийского моря (Рис., А) на НИС «Академик Борис Петров», который оснащен новейшим геоакустическим оборудованием. Были получены батиметрические данные высокого разрешения на двух ключевых полигонах на повторяющихся галсах (Рис., Б) многолучевым эхолотом (МЛЭ) Reson SeaBat T50-ER

(частота 400 кГц, 1024 луча) и высокоразрешающие сейсмоакустические профили донных осадков параметрическим профилографом Atlas Parasound P70. Батиметрическая съемка сопровождалась измерением профиля скорости звука в водной толще с использованием зонда Valeport miniSVP. В двух экспедициях была использована система спутникового позиционирования в режиме РТК для максимально точного измерения глубин МЛЭ. Эти съемки были использованы для приведения предыдущих сравнительных моделей рельефа к единому уровню. В геоинформационной системе ArcGIS была рассчитана разность между моделями рельефа за 2021-2023 гг.

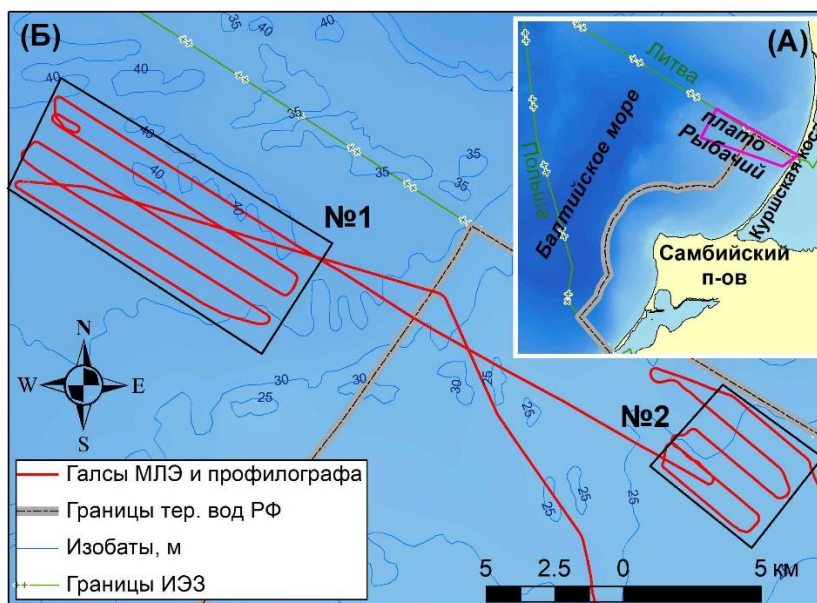


Рис. (А) – Расположение района исследования в юго-восточной части Балтийского моря; (Б) – схема повторяющихся галсов геофизических работ, выполненных в 2023 г. в 53-м рейсе НИС «Академик Борис Петров». Батиметрическая основа взята из [4].

Результаты

Проведенный анализ полученных цифровых моделей разности глубин позволил выявить довольно значительные межгодовые изменения поверхности рельефа. Обнаружены размыв и переотложение песка, появление промоин, пространственное смещение песчаных валов и изменение их форм. Гистограмма разности глубин показала флуктуации в пределах ± 50 см на отдельных участках в районе песчаных полей в течение одного года. Тем не менее средние значения глубины на обоих полигонах изменились незначительно, что свидетельствует о локальных переотложениях песка без выноса его за пределы района исследования. Таким образом, было установлено, что современные литодинамические процессы оказывают влияние на формирование песчаных тел даже за один год. В перспективе по изменениям формы песчаных тел планируется определить направление перемещения осадков для оценки гидродинамической компоненты. Очевидно, что при таких скоростях придонных течений за значительные промежутки времени сотен и тысяч лет рельеф дна мог претерпевать существенные трансформации. Соответственно, сохранность реликтовых эоловых дюн, образованных около 10 тыс. лет назад, ставится под вопрос. Вероятно, подводные дюны являются относительно современными образованиями, которые сформировались под воздействием придонных течений в ходе литориновой трансгрессии. Тем не менее, источником материала для формирования песчаных тел могли быть реликтовые эоловые дюны, которые размывались при повышении уровня моря в результате береговой абразии.

Заключение

В формировании рельефа в четвертичном этапе развития Балтийского моря остается еще много вопросов. Полученные новые данные позволят уточнить кривую относительного изменения уровня моря в позднем плейстоцене и голоцене и выполнить палеогеографические реконструкции для юго-восточной части Балтики. Это позволит прийти к лучшему пониманию палеоэкологических проблем и эволюции Балтийского моря. В дальнейшем планируется продолжить и расширить геоморфологический мониторинг, а также выполнить геологические исследования.

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН, тема №FMWE-2021-0012.

Список литературы

1. Andrén T. The Development of the Baltic Sea Basin During the Last 130 ka. (In Harff, J., Bjorck, S. & Hoth, P. (eds.) // *The Baltic Sea Basin*. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg. – 2011. – pp. 75-97.
2. Блажчишин А. И. Палеогеография и эволюция позднечетвертичного осадконакопления в Балтийском море // Калининград: Янтарный сказ, 1998.
3. Uścińowicz, S. Relative Sea Level Changes, Glacio-Isostatic Rebound And Shoreline Displacement In The Southern Baltic. // *Polish Geological Institute Special Papers* – 2003.
4. Gelumbauskaite L.-Z., Grigelis A., Cato I., Repecka M., Kjellin B. Bottom topography and sediment maps of the Central Baltic Sea. Scale 1:500,000 // Vilnius-Uppsala: LGT SERIES OF MARINE GEOLOGICALS MAPS No.1. – 1999. – № 54.

УДК 911.2

Рубрика 39.19.31

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОТЛОВИН ВЫДУВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ БАЛТИЙСКОЙ КОСЫ

GEOECOLOGICAL METHODS RESEARCH DEFLATION BASIN ON THE EXAMPLE OF THE BALTIC SPIT

Задоя Леонид Сергеевич¹

¹ БФУ имени Канта

Zadoya Leonid Sergeevich¹

¹ IKBFU

Введение и цель работы

Котловины выдувания распространённые эрозионные формы рельефа на побережье Балтийского моря в районе Балтийской и Куршской кос. Эти глубокие впадины образуются в результате эрозии ветра на эоловых формах рельефа, такие как дюны и рыхлые песчаные почвы.

Для исследования данного явления использовались геоэкологические методы исследования, такие как: геоморфологический анализ, аэрокосмический метод, картографический метод. Объект исследования - котловины выдувания на дюнных формах рельефа Балтийской Косы.

Целью данной работы является использование геоэкологических методов исследования для дистанционного мониторинга котловин выдувания и выведение тренда их распространения.

Результаты

Главными и основными причинами появления и распространения котловин выдувания на дюнах выделяют: эоловые процессы, антропогенное воздействие, волновую деятельность ветра. Использование картографических методов, как инструмент для визуализации и оценке масштабов распространения котловин по космическим снимкам выстроенных в хронологическом порядке, позволили определить масштабы распространения котловин за временный промежуток и вывести тренд. Процесс распространения котловин выдувания приводит к занесению растительного покрова, объектов инфраструктуры песчаным материалом, что негативно сказывается на дальнейшем функционировании.

Выводы

Таким образом учитывая данную прогрессию развития деструктивных процессов на побережье Балтийской косы, можно выявить значительное снижение функциональности авантюн. Дюны являются динамичной формой рельефа, их продвижение в глубь суши практически невозможно

остановить. Но в этом и заключается их особенность, и процесс их перемещения и выдувания можно только замедлить.

Список литературы:

1. Бадюкова Е. Н. и др. Палеогеографические реконструкции на некоторых участках побережьях юго-востока и востока Балтики // Пути эволюционной географии. – 2016. – С. 30-33.
2. Берг, Лев Семенович, Ландшафтно-географические зоны СССР / Л. С. Берг. - Ленинград: Ин-т растениеводства, 1930
3. Волкова И. И., Белов Н. С., Шаплыгина Т. В. Геопространственный анализ природно-антропогенной трансформации эоловых прибрежно-морских природных комплексов // Береговая зона моря: исследования, управление, перспективы. – 2018. – С. 56-62.
4. Горячкин Ю. Н. Изменения береговой зоны Евпатории за последние 100 лет // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. – 2020. – Т. 1. – С. 1.
5. Дауётас М. О закреплении и облесении приморских песков Литовской ССР // Лесное хозяйство. 1956. № 2. С. 53–56.
6. Маликова Е.Л. Об эоловых формах рельефа на примере надымского парибоя // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6. № 3. С. 321-334.
7. Маликова Е.Л. Об эоловых формах рельефа на примере надымского парибоя // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2020. Т. 6. № 3. С. 321-334.
8. Ульст В.Г. К вопросу о закономерностях развития эоловой аккумуляции на морском берегу // Тр. Океаногр. ком. 1959. Т. IV. С. 91–100.
9. Łabuz T. A. Coastal dunes landscape change in Poland — a research method based on photographic studies // Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issues. 2016. Vol. 60, №3. P. 79—98.
10. Thomas Doyle, Andrew Short, Peter Ruggiero, Colin D. Woodroffe // Interdecadal Foredune Changes along the Southeast Australian Coastline // 1942–2014 June 2019 Journal of Marine Science and Engineering 7(6):177
11. Thomas Doyle, Andrew Short, Colin D. Woodroffe // Foredune evolution in eastern australia: a management case study on Warilla beach // Conference: International Conference on Coastal Sediments 2019 May
12. Quentin L.A., Risa A., Meagan E.W Experimental test of the influence of native and non-native plant species on sand accretion on a U.S. Pacific northwest dune // Conference: Coastal Sediments 2023 March 2023
13. Vanda C.S., Alexandre M.C. Letícia M., Should Anthropoc Ridges Framed as Foredunes Be Considered Real Dunes? // October 2022 Geosciences 12(264):1-25

УДК 551.435.3

Рубрика 38.47.15

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕРЕГОВЫХ
ТЕРРАС ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА

PRELIMINARY RESULTS OF LAKE LADOGA COASTAL TERRACES FIELD SURVEY

Аксенов Алексей Олегович¹, Большиянов Дмитрий Юрьевич¹, Правкин Сергей Александрович¹, Лебедев Георгий Борисович¹

¹ *ФГБУ "Арктический и антарктический научно-исследовательский институт", Санкт-Петербург*

Aksenov Aleksei Olegovich¹, Bolshiyarov Dmitriy Yurievich¹, Pravkin Sergei Aleksandrovich¹, Lebedev Georgii Borisovich¹

¹ *FSBI "Arctic and Antarctic Research Institute", Saint-Petersburg*

Введение

Летом 2023 года на побережье Ладожского озера были выполнены полевые работы с целью реконструкции снижения уровня водоема после окончания Ладожской трансгрессии. Для достижения этой цели выполнены следующие виды исследований: геоморфологическое профилирование береговых форм рельефа при помощи оптического нивелирования, шурфование и отбор проб из береговых форм рельефа, а также бурение и отбор проб из торфяников. Работы проведены на южном берегу озера, на Стороженском полуострове и на западном берегу, в Тайпаловском заливе. Оба объекта характеризуются хорошо выраженными береговыми формами, такими как террасы, валы, бары. В межваловых понижениях сформированы торфяники.

Методы

Нивелирование выполнено при помощи оптического нивелира Geobox №8-26. Нивелирный ход велся от уреза воды или от геодезического пункта с известной высотой. Высота уреза определялась по гидропосту в Сторожно. После нивелирования производился отбор проб методом шурфования из береговых форм рельефа на ОСЛ-датирование и диатомовый анализ. Отбор образцов для радиоуглеродного датирования и диатомового анализа из торфяников выполнен при помощи торфяного бура.

Результаты и выводы

На Стороженском полуострове геоморфологический профиль выполнен от уреза воды до наиболее высокого вала, расположенного на абсолютной высоте 17.1 м (высота гребня - 18.8 м). ОСЛ-возраст, полученный по образцу, отобранному из этого вала, равен 2.9 ± 0.2 тыс. л.н., что соответствует времени максимума Ладожской трансгрессии [Malachovskij et al., 1996]. Соответственно, нижерасположенная аккумулятивная терраса, осложненная береговыми валами, формировалась уже после максимальной стадии трансгрессии. На этой террасе отобраны образцы для ОСЛ-датирования из береговых валов на высоте 13.6 м и 8.0 м. Терраса

заканчивается на высоте 7.3 м. Ниже, вплоть до уреза воды сформирована первая терраса, осложненная 2-3 валами. Возраст этой поверхности определяется интервалом от 70 до 450 л.н. [Abakumov et al., 2019].

Рядом с валом максимума Ладожской трансгрессии был пробурен торфяник, в котором под 1.4 м торфа и гиттии залегают осадки береговых фаций (песок и гравий с мелкой галькой). С контакта органического и минерального материалов отобраны образцы для радиоуглеродного датирования.

В Тайпаловском заливе проложен геоморфологический профиль от уреза воды до флювиогляциального уступа. Ниже уступа располагается верховое болото, которое с другой стороны ограничивается крупным береговым баром. Ранее нами уже были изучены отложения этого торфяника [Аксенов и др., 2020]. Время его возникновения датируется средним голоценом (6.9-6.5 тыс. л.н.). Береговой бар, замыкающий болото, располагается на абсолютной высоте 16 м, а отметка его гребня - 21.4 м. На вершине, а также у дистального подножия бара отобраны образцы для ОСЛ-датирования. Предположительно, возникновение этого бара соответствует времени максимума Ладожской трансгрессии. Вниз к урезу от бара залегают аккумулятивная терраса с береговыми валами высотой 1-2 м. Из вала, расположенного на высоте 11.5 м отобран образец для ОСЛ-датирования с глубины 145 см. Терраса с проксимальной стороны ограничена береговым баром. Подножие бара находится на высоте 6.4 м, а его высота - 3 м. На проксимальном склоне бара был выполнен шурф, и с глубины 185 см также отобран образец для ОСЛ-датирования. Вслед за баром, по аналогии со Стороженским полуостровом располагается первая терраса.

Сравнивая две береговых системы, можно сделать определенные выводы. В болото Тайпаловского залива, судя по возрасту болота, воды Ладожской трансгрессии не проникали. Соответственно, мы можем полагать, что уровень трансгрессии определяется проксимальным подножием бара, ограничивающего болото, то есть 16 м. На Стороженском полуострове высота максимума трансгрессии определяется подножием вала возраста 2.9 тыс. л.н. и равна 17.1 м, то есть на 1 м выше, чем в Тайпаловском заливе. Такая разница может быть обусловлена тектоническим режимом территории. Геоморфологические профили двух береговых систем также отличаются. Терраса Ладожской трансгрессии на Стороженском полуострове стабильно понижается с 17 до 8 м, при этом береговые валы практически отсутствуют. Но с 8 м до бровки террасы уклон поверхности становится нулевым, при этом формируются многочисленные береговые валы. Такая ситуация, вероятно, указывает на стабилизацию уровня воды в период формирования этой поверхности. В Тайпаловском заливе, напротив, мы наблюдаем понижение высоты террасы с постоянным уклоном и береговыми валами, сформированными на всем протяжении террасы. Это свидетельствует о постоянном снижении уровня воды. Ожидаемые датировки позволят уточнить характер изменений уровня воды на этих двух объектах.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-24-00319, <https://rscf.ru/project/23-24-00319/>

Список литературы:

1. Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Большианова О.Д., Селиванов Н.С., Дудаков С.М. Результаты исследований береговых образований Ладожского озера по данным геоморфологического профилирования // Рельеф и четвертичные образования Арктики,

Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. – 2020. Вып. 7. – С. 252–258.

2. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Orlova K.S. Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga // Tomsk State University Journal of Biology. – 2019. – No. 48. – P. 6–31.
3. Malachovskij D.B., Delusin I.V., Gej N.A., Dginoridzse R.N. Evidence from the Neva River Valley, Russia, of the Holocene history of Lake Ladoga // Fennia. – 1996. – vol. 174. – No. 1. – P. 113–123.

УДК 551.4.042

Рубрика 38.47.15

ФЕСТОННЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА ЛАГУННОГО БЕРЕГА КУРШСКОЙ КОСЫ
 BEACH CUSPS OF THE LAGOON COAST OF THE CURONIA SPIT

Михневич Галина Сергеевна¹, Ефимова Ксения Алексеевна¹

¹ *Балтийский федеральный университет им. Иммануила Канта, Калининград*

Mikhnevich Galina Sergeevna¹, Efimova Ksenia Alekseevna¹

¹ *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad*

Введение

Куршская коса – уникальный геоморфологический объект, характеризующийся развитием разнообразных процессов; одним из наиболее ярких является волновая деятельность, сосредоточенная как берегу Балтийского моря, так и на берегу Куршского залива. Для берега Куршского залива свойственно сочетание волновой активности с резкими изменениями его уровня, что приводит к быстрой перестройке пляжевой зоны даже при небольшом волнении. Достаточно часто возникают фестонные формы, практически не описанные в литературе [1, 2]. **Пляжевые фестоны** – периодически возникающие аккумулятивные формы рельефа, находящиеся в субаэральной зоне и часто формирующиеся в зоне заплеска прибойного потока обычно вблизи уровня высоких приливов [4]. Плановое положение береговой линии, осложненной фестонами, напоминает синусоиду: ритмично чередуются мелкие серповидные бухты и остроконечные мысы (рога, выступы). Мысы в процессе разрушения иногда подрезаются волнами и образуют миниатюрные уступы. Перед бухтами на дне формируются мелководные шлейфы, особенно хорошо очерчиваемые крутым свалом отсыпи на песчаных пляжах [3]. Пляжевые фестоны имеют размеры в длину от одного до нескольких десятков метров. Формируются они из материала различной крупности - от крупной гальки до тонкого песка, но лучше выражены на грубозернистых пляжах; часто встречаются на пляжах, сложенных смесью песка и гальки. Время существования фестонов от нескольких часов до нескольких дней [4]. Фестоны образуются на берегах различных морей и озер вне зависимости от их географического положения, однако механизм их образования до сих пор непонятен. Таким образом, пляжевые фестоны остаются плодотворной темой исследований, требующей глубокого понимания различных гидродинамических и морфодинамических процессов. В работе будут рассмотрены морфологические особенности фестонных форм, развивающихся на лагунном берегу Куршской косы.

Материалы и методы

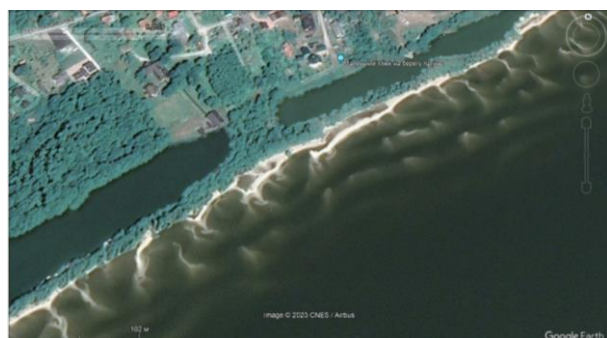
Фактической основой работы послужили результаты ежемесячных наблюдений за морфологией пляжевой зоны лагунного берега Куршской косы в районе пос. Морское и Рыбачий в 2022-2023 гг. и общедоступные снимки Google (Google Earth Pro), а также данные об уровнях, полученные с помощью мареографа Log_aLevel, расположенного со стороны Куршского залива в районе променада у Музейного комплекса Национального парка «Куршская коса» (14-ый км косы).

Результаты

Анализ космических снимков за период 2006-2022 гг. показал, что фестоны появляются достаточно часто, преимущественно в теплое время года (с марта-апреля по сентябрь-октябрь, табл.), хотя это может быть связано с тем, что снимки, полученные в зимнее время, характеризующееся сильной облачностью, мало информативны. В связи с этим интересен факт наблюдения замерзания фестонов при установлении льда на заливе в декабре 2022 г. (рис. 2Б).

Таблица – Примеры развития фестонов на лагунном берегу Куршской косы

Дата	Район распространения фестонов
8.04.2006	Севернее пос. Морское до мыса Восточный
22.05.2006	Орнитологическая станция –мыс. Птичий, турбаза «Дюны» - г. Белая
29.04.2007	Орнитологическая станция –мыс. Птичий
10.07.2010	Севернее пос. Морское до мыса Восточный, пос. Морское
11.06.2012	Севернее пос. Морское до мыса Восточный
26.04.2014	Севернее пос. Морское до мыса Восточный, Орнитологическая станция –мыс. Птичий, пос. Морское, высота Эфа – дюна Ореховая, Танцующий лес
13.05.2018	Севернее пос. Морское до мыса Восточный
14.06.2018	Севернее пос. Морское до мыса Восточный, пос. Морское
14.06.2019	турбаза «Дюны» - г. Белая
21.06.2019	Орнитологическая станция – мыс. Птичий, турбаза «Дюны» - г. Белая, южнее пос. Рыбачий
20.09.2021	Севернее пос. Морское до мыса Восточный
2.10.2021	Севернее пос. Морское до мыса Восточный, пос. Морское
20.03.2022	Орнитологическая станция – мыс. Птичий
18.04.2022	высота Эфа – дюна Ореховая, южнее пос. Рыбачий



А)



Б)

Рисунок 1 – Примеры фестоны на участке намытой дамбы в пос. Морское 14 июня 2018 г. (А) и 2 октября 2021 г. (Б) (Снимки Google)

За год натурных наблюдений фестоны отмечались неоднократно: 4.09.2022 в районе пос. Морское у намытой защитной дамбы; 11.09.2022 на участке Орнитологической станции – мыса Птичьего, близ г. Белой (рис. 2А); 17.12.2022 в районе пос. Морское у защитной дамбы (рис. 2Б); 6.05.2023 южнее пос. Морское у защитной дамбы; 11.06.2023 в районе пос. Морское и южнее у защитной дамбы. Кроме фестонов неоднократно наблюдались валы, косы одностороннего и двухстороннего питания. Распространяются фестоны на различных

участках лагунного берега Куршской косы, за исключением южного сегмента до турбазы «Дюны», где берег зарос тростниковой растительностью.

Параметры фестонов испытывают вариации во времени и пространстве. Фестоны имеют различную форму – остrokонечные, молотовидные, в виде округлых наволоков (т.е. как эрозионного, так и аккумулятивного типа по В.П. Зенковичу [3]) симметричные и асимметричные. Длина – несколько метров, иногда более 10 м. Почти всегда по забуруниванию волн залива заметно, что фестоны продолжаются на подводном береговом склоне. Общая длина этих «охвостий», прослеживающихся на снимках, составляет 20-30 м, а в редких случаях 50-100 м. Анализ морфологии пляжа подтверждает мнение В.П. Зенковича о том, что фестоны появляются практически внезапно, в считанные минуты и часы, и этому событию предшествует долгое (несколько недель) существование пляжа с ровной линией уреза воды [3]. Интересно, что на протяженных участках берега четкого ритмичного характера фестонов не отмечалось; вдоль берега часто происходит смена расстояний между выступами, изменение длин надводных частей фестонов и их охвостий. В качестве примера можно указать ситуацию 21.06.2019 г., развивавшуюся близ г. Белой. Южнее г. Белой расстояние между фестонами составляло 76-95-86-89 м (т.е. в среднем 86 м), длины охвостьев – около 100 м; охвостья сориентированы под углом 125-130°. Часто в бухтах появляются перпендикулярные валы, разделяющие фестоны на более мелкие циркуляционные ячейки. Чуть севернее г. Белой расстояния между фестонами составляли 51-47-57-49-49 м, длины охвостий около 45 м, ориентировка 155-160°.

Иногда донный рельеф бухт формирует сложный рисунок, как 13.05.2018 г. на участке от оз. Лебедь до мыса Восточного. Фестоны невыдержаны, охвостья распадаются на отдельные сегменты. В бухтах – ряды валов с расстояниями между ними в 20-25 м. Таким образом, в один день наблюдения при продвижении вдоль берега достаточно часто происходит изменение морфологии фестонов вплоть до их полного исчезновения, что связано, вероятно, с самыми незначительными колебаниями глубины залива, уклона дна, направления берега или характера волн. Сформированные фестоны могут демонстрировать известную степень устойчивости, о чем говорят факты их существования на снимках, сделанных с интервалом 2-4 недели; в отдельных случаях они перестраиваются вслед за волновым полем, иногда размываются. Если волнение изменится радикально, фестоны разрушаются.



А)



Б)

Рисунок 2 - Примеры фестонов: А) близ Орнитологической станции (4 сентября 2022 г.);
Б) близ пос. Морское, у намытой дамбы (17 декабря 2022 г.)

Обсуждение результатов

По мнению Е.Н. Бадюковой и др. в Калининградской области фестоны в большей степени выражены на Балтийской косе, чем на Куршской, что объясняется берегоукрепительными мероприятиями на берегу Куршского залива, а именно – высадкой тростниковой растительности для смягчения волнового воздействия и, возможно, растений-пескоукрепителей [1]. Отмечалось, что фестоны на Куршской косе можно часто встретить в пос. Морское. Было замечено, что выступы фестонов имеют продолжение на подводном береговом склоне. Отмечалось, что в 2008–2010 гг. фестоны практически исчезли в связи с усилением деструктивных береговых процессов [1], однако, как показывает приведенный анализ, факт появления фестонов не является редким. Можно предположить, что фестоны появляются на участках, характеризующихся избыточным количеством осадочного материала, перемещающегося в береговой зоне. Этот материал может появляться в результате размыва аккумулятивного тела дюн (в районе от Орнитологической станции до г. Белой) или дамбы-пересыпи (пос. Морское). Кроме того, присутствие фестонов в районе пос. Морское может быть связано и с мобилизацией осадочного материала, поступающего за счет дефляции или размыва дюны Ореховой. В указанных случаях фестоны имеют более значительные размеры и частую повторяемость.

Как считается, фестоны также связаны с совместным действием волнения и сгонно-нагонных течений на подводном склоне с наиболее благоприятными уклонами [1]. Такие уклоны, вероятно, могли сформироваться в пос. Морское в процессе искусственного намыва дамбы. Наметившиеся на искусственном аккумулятивном берегу волновые фестоны быстро преобразовывались нагонными течениями, которые наследовали и разрабатывали межфестонные ложбины. Во время понижения уровня воды при ветровых сгонах фестоны вытягивались сгонными течениями, образуя длинные гряды. Подтверждением этого предположения является достаточно быстрое падение уровня залива на 30-60 см в дни, когда наблюдались фестоны.

Заключение

Фестоны – одно из проявлений деятельности прибойного потока, которое в условиях активной динамики осадочного материала под влиянием волнения и сгонно-нагонных явлений, характерных для Куршского залива, фиксируется достаточно часто. Благоприятные для формирования фестонов гидрометеорологические условия складываются преимущественно в весенне-летний период, а возможности развития ритмичного заплеска прибоя и активного перемещения песчаного материала создаются только на участках берега, лишенных водной растительности. Наиболее вероятно появление фестонов на стадии аккумуляции пляжа, после уменьшения волнения или при резком падении уровня залива, однако не исключена возможность роста фестонов и в штормовых условиях.

Благодарность

Авторы благодарят ст. научного сотрудника, начальника научного отдела ФГБУ «Национальный парк «Куршская коса» Майорову Ю.А за помощь в организации работ, зав. лабораторией геоэкологии АО ИО РАН Ульянову М.О. за предоставленные данные об уровне Куршского залива.

Список литературы

1. Бадюкова Е.Н. и др. Пляжевые фестоны на аккумулятивных берегах юго-восточной Балтики // Геоморфология. – 2014. – №. 4. – С. 31-39.
2. Жиндарев Л.А., Лукьянова С.А., Бадюкова Е.Н. Современная динамика лагунных берегов Куршской и Вислинской кос (Юго-Восточная Балтика) // Балтийский регион - регион

сотрудничества - 2019. – 2020. – С. 278-291.

3. Зенкович В.П. Основы учения о развитии морских берегов. - М.: Изд-во АН СССР, 1962. - 719 с.
4. Сафьянов Г.А. Геоморфология морских берегов. - М.: Изд-во МГУ, 1996. - 400 с.

Морские ландшафты

Стендовые доклады

Marine underwater landscape

Poster presentations

УДК 551.89

Рубрика 39.19.00

ФОРМИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА О. АНЗЕР (СОЛОВЕЦКИЙ АРХИПЕЛАГ, БЕЛОЕ МОРЕ) В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ

VEGETATION COVER FORMATION OF ANZER ISLAND (SOLOVETSKY ARCHIPELAGO, WHITE SEA) IN THE LATE HOLOCENE

Левкова Дарья Николаевна¹, Сапелко Татьяна Валентиновна², Кузнецов Денис Дмитриевич², Леонтьев Пётр Александрович¹, Субетто Дмитрий Александрович¹

¹ РГПУ им. А. И. Герцена, г. Санкт-Петербург

² ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург

Levkova Darja Nikolaevna¹, Sapelko Tatyana Valentinovna², Kuznetsov Denis Dmitryevich², Leontyev Petr Alexandrovich¹, Subetto Dmitry Alexandrovich¹

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg

² Institute of Limnology, Russian Academy of Science – SPC RAS, St. Petersburg

Введение

Детализация палеогеографических схем природно-климатических изменений является важной составляющей реконструкций поздне- и послеледниковой истории развития Белого моря. Применение разнообразных методов датирования и исследования осадочных отложений позволяет уточнить процесс формирования природных обстановок на региональном уровне.

Соловецкий архипелаг (65°10' и 64°57' с.ш. и 35°32' и 36°16' в.д.) расположен в юго-западной части Белого моря при входе в Онежский залив. Анзер — второй по площади остров архипелага, по географическому положению является наиболее удаленным островом от материкового побережья. В Беломорском регионе происходило наложение эвстатического изменения уровня Мирового океана и тектонических движений, амплитуда которых менялась в широких пределах [Евзеров и др., 2007, Колька и др., 2012]. Остров Анзер является ключевой площадкой для реконструкции относительного перемещения береговой линии в южной части беломорского бассейна в послеледниковое время. Одним из палеогеографических методов исследования является спорово-пыльцевой анализ, позволяющий провести реконструкцию климатических условий, растительных сообществ и ландшафтов прошлого. Результаты исследований позволяют установить, как формировался растительный покров под влиянием природных и антропогенных факторов, проследить их влияние.

Соловецкий архипелаг известен прежде всего своим уникальным историко-культурным наследием, неотъемлемой частью которого являются ландшафты. Удаленность острова от материковых побережий и изолированность обуславливает своеобразие его природы. В послеледниковую историю формирование ландшафтов происходило не только под влиянием изменяющихся природных условий, но и в результате активной деятельности человека. Благодаря охранной деятельности Спасо-Преображенского Соловецкого ставропигиального монастыря и сотрудников Соловецкого государственного историко-архитектурного и природного музея-заповедника на архипелаге сохранились территории, свободные от сильной

антропогенной нагрузки, на которых изучение динамики растительности и природной среды особенно перспективно.

Для полноценного представления хода эволюции ландшафтов Беломорского региона в голоцене необходимо проследить, как происходило их формирование. Для сопоставления выбраны разрезы (Таблица 1), географически близкие к о. Анзер, и монография Малясовой Е. С., в которой подробно рассмотрены палинологические исследования во всей акватории Белого моря [Малясова, 1976, Плешивцева, 1970, Девятова, 1976, Колька и др., 2019, Сапелко и др., 2014].

Таблица 1. Сравнительная характеристика растительности голоцена в Беломорском регионе по данным палинологического анализа на основе литературных данных

Шкала Блитта-Сернандера, лет назад	Белое море, Малясова Е.С., 1976	Побережье Двинской губы, Плешивцева Э.С., 1970	Юго-Запад Беломорья (долина р. Выг), Девятова Э.И., 1976	Онежский залив (с. Малошуйка), Лаврова Н.Б., 2019	о. Большой Соловецкий, Сапелко Т.В., 2014
0-1000 SA	Доминируют сосновые леса. Роль ели снижена	Доминируют сосновые и березовые леса. Значительная роль ели	Доминируют березовые и сосновые леса. Во второй половине периода лесные массивы сужаются. Сокращается площадь еловых лесов.	Доминируют сосновые и еловые леса	Широко распространены сосновые и еловые леса. Снижена роль березы
1000-3000 SB	Максимальное распространение еловых лесов. Снижение роли широколиственных пород	Максимальное распространение еловых лесов. Сокращение роли сосны и широколиственных пород. Со второй половины доминируют сосна и береза	Преобладают сосновые и березовые леса с примесью широколиственных пород. Максимальное распространение еловых лесов.	Распространены березовые, сосновые и еловые леса с небольшой примесью широколиственных пород	Доминируют еловые леса
3000-5000 AT	Преобладают сосновые леса. Значительная роль ели и ольхи. Максимальное распространение широколиственных пород	Широко распространены еловые и сосновые леса. Во второй половине периода максимальное участие широколиственных пород	Распространены березовые и сосновые леса с примесью ели	Распространены сосновые, еловые и березовые леса с примесью широколиственных пород	Распространены елово-березовые и сосновые леса с примесью широколиственных пород
5000-8000 BO	Преобладают сосновые леса. Распространяется ель. Редко встречаются широколиственные породы	Преобладают сосновые и березовые леса. Появляются широколиственные породы	Распространены березовые леса, увеличивается роль сосны. Появляются темнохвойные породы	Распространены сосново-березовые леса	
8000-10000 PB	Распространяются березовые и сосновые леса	Распространены березовые леса	Распространены березовые леса	Распространены березовые леса	

В послеледниковье значительно увеличивается количество древесной пыльцы за счет сокращения пыльцы трав. В основном преобладают сосновые леса с примесью ели, берёзы и ольхи. В атлантическом периоде достигается максимум широколиственных пород, значительное распространение еловых лесов. К суббореальному периоду пыльца древесных пород имеет абсолютное господство в спектрах, пыльца широколиственных пород встречается единично. Для субатлантического периода характерно исчезновение пыльцы широколиственных пород, окончательно формируется внешний облик современных лесов.

С 2006 года проводятся палеолимнологические работы по изучению донных отложений озер Большого Соловецкого острова с целью установления детальной хронологии перемещения береговой линии Белого моря в голоцене. Установлена хронология изоляции озёр, выполнена реконструкция развития озёрных ландшафтов в голоцене, подтверждённая данными спорово-пыльцевого анализа и радиоуглеродными датировками [Субетто и др., 2012, Сапелко и др., 2014].

По результатам спорово-пыльцевого анализа известно, что на о. Большом Соловецком около 5,5 тысяч лет назад начали формироваться озерные ландшафты, представленные елово-березовыми и сосновыми лесами с примесями широколиственных пород, среди которых отмечаются липа, вяз, граб и дуб. На теплые условия также указывает развитие водных и прибрежно-водных растений. В травянистом покрове доминируют злаки и осоковые. Около 3

тысяч лет назад в суббореальный период среди древесных пород доминирует ель. Количество широколиственных пород резко сокращается. Среди трав в основном преобладают злаки, появляются рудеральные виды, указывающие на присутствие человека, – щавель, подорожник, крапива. Увеличивается роль разнотравья. Распространяются различные виды семейства верескоцветных. Около 2 тысяч лет назад в субатлантический период среди широко распространенных еловых лесов увеличивается роль сосны. Количество березы постепенно к современному периоду снижается. Среди трав преобладают злаки и осоковые, снижается роль разнотравья. Увеличивается разнообразие рудеральных видов. Снова распространяются водные и прибрежно-водные растения [Сапелко и др., 2014].

Материалы и методы

Соловецкий архипелаг состоит из 6 крупных и более 110 малых островов. Самым крупным является о. Большой Соловецкий (225 км²), второй по величине — Анзер (45 км²), расположенный в северо-восточной части архипелага и отделённый от о. Большого Соловецкого и других островов проливом Анзерская Салма. Протяженность Анзера с запада на восток составляет около 16 км, с севера на юг — 6 км в западной части и менее 1 км в восточной. Большая часть острова расположена на отметке выше 20 м над у.м. [Природная среда..., 2008]. Современный рельеф сильно расчленен и образован реликтовыми возвышенными ледниковыми и водно-ледниковыми грядами. Западная часть острова занята холмисто-моренной и озерно-ледниковой равнинами с абсолютными отметками 30-50 м. В северо-западной части расположена самая высокая точка — гора Вербокольская (86,5 м). Отрицательные формы рельефа представлены ложбинами стока талых ледниковых вод, днища которых сложены глинистыми, плохо сортированными песками и алевритами. В центральной части острова отмечены камовые возвышенности, достигающие значительной высоты (г. Голгофа (63,8 м) и ее окрестности). В крайнем восточном секторе острова сформированы флювиогляциальные террасы. На открытых незалесенных участках юго-восточного побережья распространены эоловые формы рельефа [Соловецкие..., 2006]

Основные ландшафты острова представлены ареалами среднетаёжной растительности на фоне типичной северной тайги. Особенностью архипелага являются экстразональные природные комплексы, не характерные для широтного расположения, тундровые приморские равнины и еловые, смешанные и мелколиственные леса разнотравного типа [Природная среда..., 2008, Шварцман, 2008].

Общее количество озер архипелага составляет 376, на о. Анзер насчитывается 31 озеро с суммарной площадью 2,17 км² [Природная среда..., 2008]. Наиболее крупные из них приурочены к его центральной части острова и имеют отметки уреза не менее 20 м над уровнем моря. Развитие озерных природных комплексов происходило в основном под действием тектоники и деятельности ледника [Шварцман и др., 2005].

В 2011 и 2015 годах на о. Анзер было выполнен отбор колонок донных отложений девяти внутренних озёр, расположенных на разных высотных отметках относительно уровня моря. Бурение производилось с плавучей платформы с применением Русского бура длиной проботборной части 1 м и диаметром 5 см.

Озеро Надбанное (65°8,8026' с.ш., 36°1,8666' в.д.) расположено на самой высокой, среди изученных озер, абсолютной отметке. Надбанное — небольшое безымянное лесное озеро с глубинами до 9 м, названное так в рабочем порядке, так как расположено недалеко от оз. Банного и выше его на отметке 20–21,5 м над уровнем моря. Берега имеют резкие уклоны, небольшая сплавина с западной стороны, с восточной — выход узкой протоки по дну ложбины в сторону оз. Банного, прерывается на бровке перед резким понижением к оз. Банному. Поверхностный сток только в периоды половодья. Колонки донных отложений были отобраны

в трёх точках с глубин 4,2–6,4 м [Кузнецов и др., 2022]. Анализируемая в настоящей работе колонка отбиралась в точке, где глубина воды составила 4,20 м. На микропалеонтологические анализы было отобрано два керна с перекрытием: 4,20–5,20 м и 5,11–6,11 м.

Нижняя часть разреза представлена плотной вязкой серой глиной, иногда опесчаненной. Выше переходный горизонт светло- и тёмно-бурой слоистой гиттии с глинистыми прослоями общей мощностью 12–15 см с чёткой границей по цвету. Замыкает разрез толща однородной гиттии тёмно-бурового цвета мощностью до 3 м. Верхние 10 см разреза — более жидкая гиттия.

Изменений условий осадконакопления выявлены с помощью литостратиграфии и определении содержания органического вещества в донных отложениях при помощи анализа потерь при прокаливании (ППП). Получены радиоуглеродные датировки для нижней части разреза. из переходного горизонта от минерогенных к органогенным отложениям с глубин 6,00–6,05, 5,94–5,99, 5,40–5,45 м. Установить возраст верхней части колонки помогут палинологические исследования.

Основные результаты и обсуждение

Непрерывная последовательность озерных отложений отражает изменение условий осадконакопления в связи с установлением условий малого изолированного озера от крупного водоёма. В нижней части разреза, совпадающей с литологическим горизонтом глин, отмечено низкое значение ППП (3-4%) [Кузнецов и др., 2022]. Резкий рост ППП (от 5 до 22%) определен в горизонте слоистой гиттии. Стабильно высокое содержание органического вещества и общий тренд к росту в горизонте однородной гиттии, где значение ППП увеличивается вверх по разрезу, достигая в верхней части 78%, после чего снижается до 68% и снова возрастает. Переход от древних, минеральных осадков к озёрным гиттиям происходит через формирование тонкослоистых органоминеральных отложений (глинистых гиттий), характеризующихся резким увеличением содержания органического вещества. Слоистый горизонт маркирует установление переходных обстановок осадконакопления в ходе изоляции водоёма от крупного бассейна.

Возраст формирования переходного горизонта лежит в интервале 10200 – 11200 кал. л. н. В оз. Надбанном зафиксировано наиболее раннее начало органогенного осадконакопления, связанное, возможно, с регрессией береговой линии, сформировавшей наиболее высокий террасовый уровень (20,5–23,5 м над уровнем моря), прослеженный по данным геоморфологической съёмки [Никишин, 1984]. Регрессия моря в начале пребореала, около 11200 кал. л. н привела к установлению условий малого изолированного водоёма в озёрных котловинах побережья о. Большого Соловецкого и в некоторых озёрах о. Анзер. Оз. Надбанное изолировалось около 11200–10500 кал. л. н. (возрастной диапазон верхней части слоистого горизонта). Непрерывное, начиная с раннего голоцена, накопление гиттии в котловине озера, указывает на то, что уровень голоценовых морских трансгрессий не достигал здесь отметок 20–22 м. над уровнем моря, современной отметки уреза оз. Надбанного. Начало формирования органогенных отложений происходит синхронно с озёрами Большое и Верхнее Зелёное на о. Большой Соловецкий, расположенных более чем на 10 м выше Надбанного [Субетто и др., 2012, Кузнецов и др., 2022]. Об этом также свидетельствуют данные диатомового анализа, указывающие на отсутствие морской диатомовой флоры в отложениях [Ludikova et al., 2021]. Скорость осадконакопления гиттии составила 0,2–0,3 мм/год, скорость регрессии береговой линии — 2–3 мм/год [Кузнецов и др., 2022].

На спорово-пыльцевой анализ изучена верхняя часть колонки с глубины 4,41–5,01 м, представленная гиттией. При экстраполяции результатов датирования из нижней части колонки на верхнюю часть, получается, что исследуемый в данной работе интервал начал формироваться после наступления атлантического периода голоцена [Левкова и др., 2021].

перемещением человека на другие стоянки. Развитие растительного покрова, отражённое в палинозоне 4, вероятно связано с монастырским периодом освоения Соловецкого архипелага — обнаруженная пыльца не характерных для современной растительности Анзера древесных пород может указывать на лесопосадки, описание которых имеется в архиве Соловецкого музея-заповедника [Ипатов и др., 2009].

Полученные результаты исследования можно соотнести с тенденцией изменения растительности позднего голоцена на о. Большом Соловецком [Сапелко и др., 2014]. В спектрах оз. Надбанного также прослеживается смена сосновых и березовых лесов с примесью широколиственных пород на доминирование хвойных лесов с примесью березовых и исчезновение естественных широколиственных пород. Выявлено присутствие человеческой деятельности. В травянистых растениях тоже наблюдается на некоторый промежуток времени увеличение роли разнотравья, что говорит о увеличении открытых пространств. Отмечается увеличение видового состава рудеральных трав. Если предположить, что построенная модель возраста для исследованного интервала донных отложений верна, то динамика развития растительности на острове Анзер повторяет тенденции растительности на о. Большом Соловецком в конце суббореального и в субатлантическом периодах.

Среди прочих рассмотренных разрезов, изученных на состав пыльцы и спор, для которых также выделяется не совсем характерное для Беломорского региона низкое содержание пыльцы ели в субатлантическом и суббореальном периоде. В работе о низовье р. Выг Девятова Э. И. рассматривает хронологию заселения юго-западной части Белого моря, низкое содержание ели и наличие пыльцы широколиственных пород автор связывает с хозяйственной деятельностью человека и переносом пыльцы с континентальной части (воздушными массами и человеком). Можно предположить, что низкое содержание ели в палиноспектрах оз. Надбанного так же может быть связано с обширными вырубками еловых лесов человеком.

Выводы

Ландшафты о. Анзер начали формироваться с начала голоцена и продолжает развиваться под воздействием не только меняющихся климатических, рельефообразующих условий, осложнённых положением территории в условиях островной изоляции, но и под влиянием хозяйственной деятельности человека. Озёрные донные отложения оз. Надбанного являются перспективным источником информации о формировании растительного покрова на о. Анзер. Результаты исследованной позволили реконструировать изменения растительности позднего голоцена, которые дополняют существующие знания о природных обстановках на Соловецких островах и в южной части Беломорского региона.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках государственного задания РГПУ им. А. И. Герцена при поддержке Министерства Просвещения РФ № 073-03-2023-049/3 и в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № FMNG-2019-0004.

Список литературы:

1. Греков И.М., Леонтьев П.А., Сырых Л.С., Субетто Д.А. Реконструкция колебаний Белого моря на территории Соловецкого архипелага / Сборник статей по материалам научно-практической конференции «природное и культурное наследие Арктики». Санкт-Петербург, 2016 г., с. 37-41.

2. Девятова Э. И. Геология и палинология голоцена и хронология памятников первобытной эпохи в Юго-Западном Беломорье. Л., 1976. 121 с.
3. Евзеров В.Я., Колька В.В., Корсакова О.П. история развития морских бассейнов в Беломорской депрессии за последние 130 тысяч лет (состояние вопроса и перспективы исследования) // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2007. № 67. С. 54-65.
4. Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Леса Соловецкого архипелага. Архангельск, 2009, 244 с.
5. Колька В.В., Корсакова О.П., Лаврова Н.Б., Шелехова Т.С., Зарецкая Н.Е. Литология, биостратиграфия и геохронология позднеплейстоцен-голоценовых осадков на побережье Онежского залива Белого моря // Доклады Академии наук. 2019. Том 485 (№ 2). С. 221-225.
6. Колька В.В., Корсакова О.П., Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б., Арсланов Х.А. 2012. Перемещение береговой линии Белого моря и гляциоизостатическое поднятие суши в голоцене // Докл. РАН. Т.442. № 2. С.263–267.
7. Кузнецов Д.Д., Лудикова А.В., Субетто Д.А., Леонтьев П.А., Греков И.М., Потахин М.С., Сапелко Т.В., Сырых Л.С., Толстобров Д.С. Хроно- и литостратиграфия озерных отложений острова Анзер (Соловецкие острова) в контексте послеледниковой истории Белого моря // Известия АН. Сер. Географическая. 2022
8. Левкова Д.Н., Сапелко Т.В., Леонтьев П.А., Субетто Д.А. Реконструкция древесной растительности голоцена на о. Анзер в Белом море по данным спорово-пыльцевого анализа озерных отложений // Морские исследования и образование: MARESEDU- 2021. X международная научно-практическая конференция, 24-28 октября 2021
9. Малясова Е.С. Палинология донных осадков Белого моря. Л., 1976. 119 с.
10. Мартынов А.Я. острова Белого моря: от мезолита до Средневековья (о древнем освоении беломорских островов по археологическим данным). Арктика и Север. № 5. 2012 г. С. 137-176.
11. Никишин Н.А. Особенности развития берегов Соловецких островов в голоцене // Вестник МГУ. Серия 5. География. 1984. № 5. С. 55–57.
12. Плешивцева Э.С. Основные этапы истории растительности побережья Двинской губы Белого моря в период бореальной и поздне- послеледниковой морских трансгрессий. Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Гидрометеиздат, Л., 1970. 268-271 с.
13. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / Под ред. Ю.Г. Шварцман, И.Н. Болотова. Екатеринбург: УрО РАН, 2007, 184 с.
14. Сапелко Т.В., Субетто Д.А. История развития озёрных ландшафтов Соловецких островов / Сборник тезисов научно-практической конференции по водным ресурсам, включая биологические ресурсы, Соловецкого архипелага. Архангельская обл., пос. Соловецкий, 2014 г., с.51-53.
15. Соловецкие острова: духовное, культурное и природное наследие. М., 2006. 680 с.
16. Субетто Д.А., Шевченко В.П., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Сапелко Т.В., Лисицын А.П., Евзеров В.Я., Беек П. ван, Суо М., Субетто Г.Д. Хронология изоляции озер Соловецкого архипелага и скорости современного озерного осадконакопления // ДАН. 2012. Т. 446. No 2. С.183–190. doi: 10.1134/S1028334X120901402.
17. Шварцман Ю.Г. Новейшие геологические и геофизические процессы на уникальных природных объектах Европейского Севера / Связь поверхностных структур земной коры с глубинными. Материалы XIV международной конференции. 2 часть. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. С. 346-349.

18. Шварцман Ю.Г., Болотова Г.Н., Болотов И.Н., Игловский С.А. Структура и пространственное распределение компонентов природных комплексов Соловецкого архипелага // Вест. Поморского ун-та. 2005. Сер. 1. Естественные и точные науки. № 1. С. 4-17.
19. Ludikova A.V., Subetto D.A., Kuznetsov D.D., Sapelko T.V. From a large basin to a small lake: Siliceous microfossils stratigraphy of the isolation basins on Big Solovetskiy Island (the White Sea, NW Russia) and its implication for paleoreconstructions // Quaternary International. – Available online 13 July 2021. In press. doi: 10.1016/j.quaint.2021.07.0073.

Гидрографические и
геофизические исследования
на акваториях

Устные доклады

Hydrographic and geophysical
offshore surveys

Oral presentations

УДК 550.834.08

Рубрика 37.01.11

ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА АКВАТОРИЯХ
TOWARD AUTOMATE GEOPHYSICAL SURVEYING AT THE SEA

**Ильинский Дмитрий Анатольевич¹, Коган Лазарь Иоханинович², Рогинский
Константин Александрович¹, Хортов Алексей Владимирович¹**

¹ *ИО им П.П. Ширшова РАН, Москва*

² *ОАО РОМОНА ИНТЕРНАЦИОНАЛ, Вунгтау*

**Ilnskiy Dmitry Anatolievich¹, Kogan LazarIohaninovich², Roginskiy Konstantin
Alexandrovich¹, Khortov Alexei Vladimirovich¹**

¹ *Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow*

² *JSC "ROMONA INTERNATIONAL", Vung Tau*

Введение

С ростом населения Земли и истощением ресурсов на суше, внимание всего прогрессивного человечества все больше и больше обращено на исследование и использование морских природных ресурсов, как на шельфе морей и океанов, так и на больших глубинах. Существующие технологии геофизических исследований на морях, несмотря на их высокое развитие, использующие самые передовые современные технологии и высокую степень автоматизации, все еще нуждаются в большом количестве человеческого труда, требующего постоянного присутствия значительного количества высокопрофессиональных людей на исследовательских судах. Присутствие людей на судах, помимо их высокой стоимости, требует создание комфортной инфраструктуры для работы и проживания, ужесточает требования по безопасности, требуется периодическая смена персонала в результате размер судов, а, следовательно, и стоимость работ растет. Эту ситуацию уже давно поняли ученые при исследовании космоса, сохраняя пилотируемую космонавтику как аттракцион для туристов и поддержания пилотируемых технологий, а все основные открытия и значимые исследования проводятся с помощью беспилотных космических кораблей. Частично такое понимание приходит и в океанологию, так пилотируемые глубоководные аппараты, уже давно заменены на безопасные беспилотные. Этот важный сдвиг проиллюстрировала недавняя катастрофа с пилотируемым аппаратом ТИТАН. Однако, существует ряд объективных технологических проблем для внедрения беспилотных геофизических исследований. Развитие современных информационных технологий и робототехники позволяет решать эти задачи.

Мы рассмотрим две области развития автоматизированных систем для сбора, обработки и интерпретации сейсмических данных. Сейчас все большее внимание уделяется донным системам наблюдений в морской сейсмике. Сбор данных на дне позволяет получать гораздо больше информации о строении недр и она, кроме того, имеет лучшее качество и достоверность по сравнению с технологией буксируемых кос. Однако, из-за того, что все еще не появилось сравнимых по производительности донных технологий, донные наблюдения

имеют все еще второстепенный характер. Они проводятся там, где без них нельзя обойтись - на мелководьях, в зонах с препятствиями для судоходства и в переходных зонах суша-море.

Другим примером развития автоматизированных систем мы рассмотрим одну из важнейших проблем сейсмической интерпретации данных полученных методом отраженных волн – общей глубинной точки (МОВ-ОГТ). В результате проведения сейсмических работ МОВ-ОГТ собранные данные после их обработки формируют сейсмическое изображение недр в виде 3-х мерного куба амплитуд отраженных от границ и других неоднородностей среды или 2-х мерного разреза в случае проведения двухмерных профильных работ. Далее стоит задача интерпретации полученных изображений, одной из которых является создание структурно-тектонических моделей. Базовой процедурой структурно-тектонического анализа данных является выделение основных сейсмических горизонтов. Сейсмические горизонты представляют собой геологически значимые поверхности, которые можно использовать для картирования геологических структур и моделей стратиграфии. Однако отслеживание горизонта по сейсмическим данным является трудоемкой и сложной задачей, и подчас требует больших трудозатрат.

Подходы к автоматизации донных сейсмических измерений. Решения и перспективы развития

Виды донных сейсмических съёмок

В донных сейсмических съёмках имеется разделение на средне глубоководные проекты с глубинами моря от 20 до 3000 м, т.е. там, где может работать технология буксируемых кос и мелководные для транзитных зон и зон с препятствиями, где технология буксированных кос работать не может. В последнее время наметился новый рынок для донных наблюдений – это так называемые гибридные съёмки, когда вместе с буксируемыми косами используются одновременно расставленные на дне на редкой сетке (1-2 км) донные сейсмические станции в варианте 2Д [1] и 3Д [2] сейсмических съёмок. Целью донных наблюдений это получения\е детальной скоростной модели для последующей обработки всех полученных сейсмических данных. При этом используется метод полно-волновой инверсии для получения скоростного разреза, который служит для улучшения изображения полученного из многокосовой съёмки. Результатом гибридной съёмки может быть ясное изображение подсолевых структур, как это показано в [2] в гибридном проекте в Мексиканском заливе при расстановке донных станций на сетке 1,2 на 1,2 км при стрельбе многокосового судна на сетке 50 на 100 м.

Другим примером разновидности гибридной съёмки – это отечественный способ наблюдений отражённых и преломлённых волн (СНОПВ) применённый в Прикаспийской впадине. Геологической задачей состояла в поиске в подсолевом разрезе карбонатных тел сравнительно небольших размеров, перспективных на поиски нефти и газа. Невысокая пластовая скорость подсолевого комплекса пород, составляющая около 4,0 км/с, указывает на то, что в исследуемом районе он представлен в основном терригенными отложениями. Скоростные модели, полученные по данным СНОПВ, были использованы для построения глубинных изображений по данным МОВ-ОГТ [3]

Глубоководные донные проекты

До недавнего времени в средне- и глубоководных проектах донные станции устанавливаются на дно исключительно с помощью дистанционно управляемых роботов (ROV). Эти подводные аппараты оснащены роботизированными руками, камерой для подводного визуального анализа, электрическими приводами для управления движением и внешними соединительными кабелями для связи и подачи питания. Аппараты ROV были разработаны в 1970-х годах для работы в условиях экстремальных давлений и низких температур. Кроме того, подводный ROV имеет в своем составе контейнер, где расположены донные станции в количестве 30-40 штук в зависимости от вида ROV. ROV имеет гидроакустическую систему

позиционирования, относительно несущего судна с точностью определения положения, как один промилле (0,001) от наклонной дальности до подводного робота со станциями. Впервые такая система для сейсмической съёмки была применена компанией *Fairfield* по заказу *British Petroleum* в 2006 году на месторождении *Atlantis* в Мексиканском заливе [4] при глубинах порядка 2200 метров. Процесс постановки станций на дно, а также их подъёма при общем количестве станций в одной постановке порядка 1000 штук занимает значительное время, особенно нерациональным выглядит подъём робота со дна к поверхности моря. Хотя уже в начале 2000-х годов существовала альтернативная технология постановки и подъёма со дна донных станций – самовсплывающие донные сейсмические станции, которая гораздо более производительна, а стоимость съёмки в 8 раз меньше по сравнению с технологией ROV. Станции в свободном падении идут на дно, а затем после выполнения программы записи данных, вызываются по гидроакустическому каналу на всплытие с обслуживающего судна. Каждая станция имеет уникальный код всплытия, что позволят контролировать процесс всплытия и сбор всплывших станций с поверхности моря. Именно с помощью этой технологии была выполнена первая в мире трехмерная глубоководная съёмка в 2001 на месторождении *Tunder Horse* в Мексиканском заливе компанией *GeoPro GmbH* по заказу *British Petroleum*[5]. В то время две основные проблемы самовсплывающей технологии не были решены. Первая – это точность попадания станции в запланированную точку на дне. При глубине 3 км и размере ОГТ бина 25 на 25 метров современные тендеры на проведение донных сейсмических съёмок требуют попадания станции в круг размером 25 метров. Вторая проблема была связана с экологией, самовсплывающая станция оставляла на дне якорь-груз. Экологи требуют, чтобы после проведения сейсмической донной съёмки дно моря оставалось. Несмотря на то, что после аварии на нефтяной платформе *Deepwater Horizon* на месторождении *Макондо* в 2010 году в Мексиканском заливе вылилось около 5 миллионов баррелей нефти, нефтяное пятно достигло площади 75 тысяч квадратных километров, что составляет около 5 % площади Мексиканского залива. Тем не менее, технология использования ROV была принята на вооружение нефтяной промышленностью в то время, в эпоху высоких нефтяных цен.

Со временем появились решения для самовсплывающей технологии для преодоления экологических ограничений. В 2012-14 годах Российская инновационная компания *Геонод* – первый резидент Сколково, создала новое поколения донных сейсмических станций обладающих рядом уникальных свойств, одним из которых было создание экологически чистого якоря-груза, который распадается на составляющие морского дна после проведения геофизических работ и не наносит никакого вреда окружающей среде[6]. Было получено 2 Российских патента на состав якоря и его конфигурацию. Другое решение этой проблемы мы рассмотрим ниже, при обсуждении станций для мелководья и транзитных зон, а именно, использование самовсплывающих станций без груза на основе двух известных технологий подъёма затонувших объектов со дна моря и представим действующий образец станции без груза.

Проблема точного положения станции на дне согласно намеченному плану (*preplot*) характерна не только для самовсплывающей технологии, но для технологии постановки станций на дно с помощью веревки или прочного троса. Эту технологию придумала компания *Fairfield*, вскоре после проведения пионерской съёмки с ROV. По-видимому, стоимость первой съёмки ужаснула клиентов и акционеров компании так, что компания вынуждена была предложить альтернативное относительно дешёвое решение. В этой технологии сначала веревка-фал с грузом выбрасывается за корму на ходу судна, затем при движении судна, донные станции через равномерные интервалы (50 или 25 м) подцепляются к ведущему фалу, один конец которого уже опущен с грузом на дно и таким образом увлекаются на дно. Ясно, что работа такой системы очень не простое дело, в ручном режиме требует сноровки и любая задержка при прикреплении станции к фалу оборачивается риском порвать или запутать основную веревку, а вероятность и возможность приблизить положение станций на дне к *preplot* гораздо

хуже, чем у самовсплывающей технологии. Очевидно, что с ростом глубины точность укладки станций на дно падает, поэтому данная технология сейчас применяется в мелководных проектах и транзитных зонах, там, где по-другому сделать нельзя. Ряд компаний сделали попытки автоматизировать технологию постановки донных станций на фале и работать в глубоководном секторе донного рынка. Компании *MagSeis*, *inApril* [7, 8] создали автоматизированные системы подцепки станций к тросу при постановке и снятия с троса при подъеме станций со дна. После подъема на борт судна и отцепления с троса станции попадают на транспортный конвейер внутри судна для доставки к месту копирования данных и подзарядки. Там робот вставляет разъем в каждый донный модуль, а потом отсоединяет разъем, ставит готовый модуль на конвейер и транспортирует его к месту сцепления с тросом для последующей постановки на дно. Понятно, что такая система требует значительного места и специально оборудованного судна всеми необходимыми приспособлениями и роботами. В результате мы получаем судно достаточно большого водоизмещения, которое не может работать на мелководье и в транзитных зонах. Да и стоимость его работы в день начинает приближаться к стоимости многокосового судна. С другой стороны, «веревочная» технология на средней и глубокой воде не обеспечивает требуемой точности постановки. Не смотря на это, компании с автоматизированной « веревочной» технологией получили достаточное количество проектов на средней и глубокой воде (до 3000 м). Проблему неточной установки станций на дно решалась количественным путем. Благодаря автоматизации работы со станциями, их количество может достигать 10 000 единиц при установке с одного судна. Такое количество станций можно установить на дне в 1,5 – 2 раз плотнее требуемого по геологическому заданию и тогда проблема неточной установки их на дне отпадает сама собой.

С другой стороны, при проведении гибридных съемок, когда между станциями 1-1,5 км, проблема точной установки на дне станций не является актуальной, даже при глубине моря 3 км. Поэтому самой лучшей технологией для этого является технология самовсплывающих станций. Есть статистика разброса этих станций при постановке на дно до 3 км глубины, среднестатистические отклонения в Индийском океане позиции на дне от точки сброса не превышают +/- 50 м [9]. Использование технологии самовсплывающих станций для этого вида съемок практически не добавляют дополнительных затрат. Станции устанавливаются менее чем за один день до начала развертывания кос с многокосового судна и собираются со дна, после завершения проекта, когда косы уже собраны обратно на судно.

Сейчас появилась новая концепция в донной сейсмике – это использование подводных автономных аппаратов-дронов (AUV), у которых появляется дополнительная функция носителя сейсмических датчиков и системы записи данных. В идеале каждый подводный дрон с донной станцией на борту самостоятельно достигает нужной точки на дне, производит необходимую запись сейсмического источника. После того, как текущая активная расстановка дронов-станций приняла все положенные по плану излучения от сейсмического источника, они затем дружно перемещаются на новые точки на дне согласно плану съемки и так далее до выполнения всего объема работ. Количество участвующих дронов-станций и их программа перемещения такая, что позволяет не делать перерывы в работе излучающего судна. Такой подход позволяет для донной сейсмической съемки достичь производительности многокосового судна и открыть широкий рынок морских работ для них. При этом стоимость съемки будет меньше, чем у многокосовых судов, так как для работы со станциями-дронам подходит практически любое судно, а судно-источник стоит значительно дешевле многокосового судна. Ряд компаний уже получили гранты от нефтяных компаний для создания первых прототипов таких дронов-станций [10]. Но этой технологии помимо технологических вызовов, предстоит преодолеть и психологический барьер, как это было в своё время с массовым внедрением автономной регистрации. До начала 2000-х годов при проведении сейсмической съемки принято было контролировать качество, путем просмотра записи каждого излучения источника. С введением автономных записывающих систем, такой возможности нет, пока не выполнен отстрел текущей расстановки. Появился даже такой

термин, как «слепая» запись, который неодобрительно характеризовал автономную технологию, но с ростом надежности электроники и развитием информационных технологий, этот психологический барьер был преодолен. В описанной выше схеме со станциями-дронами не реальной возможности проверить записи на всех станциях, пока не закончен отстрел всего проекта. Конечно, можно использовать выборочно, гидроакустическую связь для контроля статуса дрона-станции на дне, но в силу большого количества дронов-станций и ограничений по энергии и полосе пропускания гидроакустики по сравнению с объемом сейсмических данных, такой подход имеет определенные пределы.

В качестве примера дрона-станции мы приведем концепцию норвежской компании *iDROP Oceano* [11]. Дрон-станция опускается на дно вод действием силы тяжести, он имеет форму ракеты с управляющими хвостовыми плавниками, которые управляют падением в горизонтальной плоскости, обеспечивая падение в планируемую точку на дне. Дрон использует неизвестную улучшенную портативную инерциальную навигационную систему. Хотя известно, что даже лучшие портативные инерционные система имеет ухудшение точности отсчета координат со временем. Лучшие системы имеют ухудшение точности за 50 минут до 30 метров. При падении дрона на дно моря глубиной 3 км со скоростью 1 м/с как раз нужно 50 минут. То есть с существующими инерциальными системами навигации пока трудно выполнить условия тендеров на проведение донных глубоководных проектов, где требуется попасть в круг радиусом 12 метров на глубине 3 км. Тем более, дрон этой компании после выполнения измерений, должен обеспечить всплытие в заданную точку на поверхности моря, чтобы его легко можно было найти и подобрать. Дрон для изменения плавучести использует камеру с воздухом, выпуская лишний при движении вниз или добавляя в нее дополнительный воздух из баллонов со сжатым воздухом при всплытии наверх. Следовательно, этот дрон имеет почти нейтральную плавучесть и поэтому приходится применять отделяемый и потом вновь присоединяемый, относительно тяжелый контейнер с сейсмическими датчиками для обеспечения хорошего сцепления сейсмоприемников с грунтом.

Для обеспечения достижение нужного положения на дне мы предлагаем использовать уже хорошо себя зарекомендовавшую самовсплывающую донную станцию с экологическим грузом. Нужно сделать не дрон, несущий донную станцию, а донную станцию с небольшими дополнениями от конструкции дрона. Её нужно оснастить трубой с хвостовым оперением-рулями, которые будут контролировать движение станции в горизонтальной плоскости при ее падении на дно. Вместо инерциальной системы навигации, нам представляется более реалистично использовать систему подводного GPS, реализованного Российской компанией «Лаборатория подводной связи и навигации» пока только для мелководья – система работает в пределах куба размером 1 куб км [12]. Система использует минимально 4 навигационных буя, которые непрерывно передают по гидроакустике сигналы со своим местоположением по обычному GPS и сигналы для измерения расстояния от объекта до них. Поэтому любой объект внутри системы, измеряя расстояния до поверхностных буюв и получая от них их текущие координаты и с помощью простой триангуляции получает свое местоположение. Каждый объект, определяющий свои координаты, использует приемный трансдьюсер в пассивном режиме с контроллером, определяющим его координаты в толще воды. Система может обслуживать неограниченное число объектов подводной навигации в силу принципа своей архитектуры. В глубоководной ситуации на море (3 км и более глубины) вместо буюв можно использовать волновые глайдеры с тем же оборудованием, для больших расстояний подводный GPS должен использовать более низкочастотный диапазон гидроакустических сигналов в полосе 7-14 кГц.

Другой возможностью увеличить производительность донных сейсмических работ на глубокой воде – это несколько модифицировать подход, связанный с применением ROV.

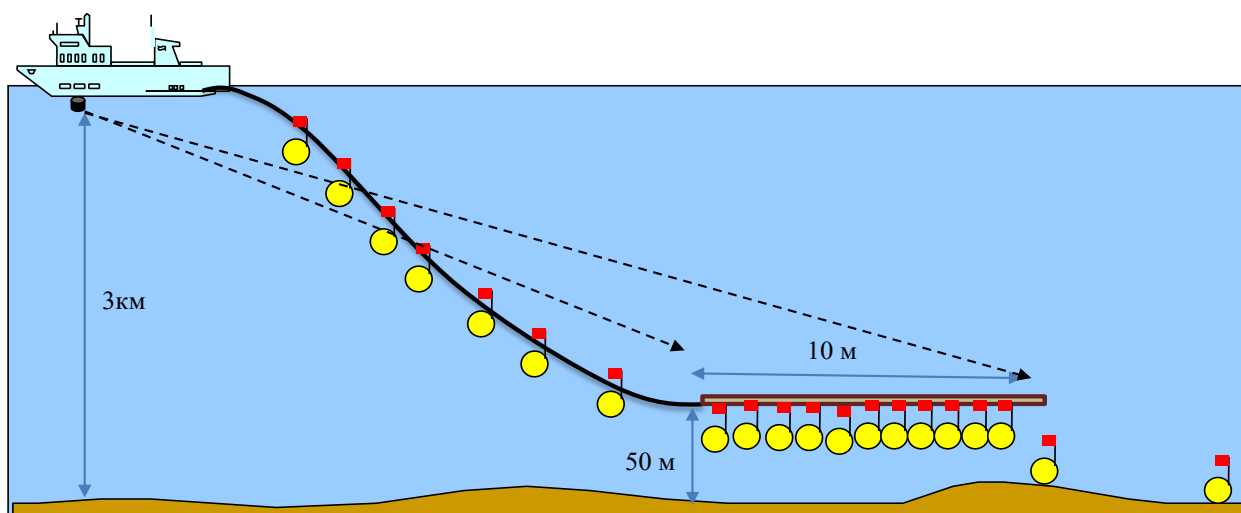


Рис. 1. Судно с устройством для постановки станции в нужную точку на дне. Специализированное упрощенное ROV. Два ключевых усовершенствования: 1) подстановочное устройство не ходит со дна на поверхность и обратно; 2) для подъема используется самовсплывание.

Судно установщик станций буксирует трубу (рис. 1) на которой установлены два подруливающих устройства, обеспечивающих прохождения буксируемой трубы по запланированной трассе установки станций с точностью ± 5 м. На переднем и заднем концах трубы установлены гидроакустические маяки-ответчики определяющие по USBL положение трубы относительно буксирующего судна и, следовательно, в абсолютных координатах. Труба буксируется на 50 м ± 20 м выше дна. На трубе установлен эхолот и датчик глубины. К трубе подвешены 20 (или больше) донных станций. По достижении очередной точки постановки с нужной точностью (сейчас в тендерах это круг диаметром 25 м), открывается магнитный захват удерживающий петлю веревку станции и она падает на дно в нужное место. При достижении следующей точки постановки, освобождается следующая станция и так далее. По буксирующей трубу кабель-тросу станции спускаются с судна (скорость падения вниз 1 м/с) к входу буксируемой трубы, где станция рукой манипулятором подвешивается на трубу для постановки на дно. Выигрыш в случае реализации системы это 1) Быстрая постановка станций на дно со скоростью 5 узлов; 2) Быстрый подъем станций со дна за счёт самовсплывания; 3) За счет использования большего количества станций, можно сократить программу отстрела.

Сейсмическая интерпретация – создание структурно-тектонических моделей. Проблема автоматизации выделения геологических горизонтов и структур.

Отслеживание горизонта по сейсмическим данным является трудоемкой и сложной задачей. Экономия времени геологов на выполнении этой задачи при интерпретации сейсмических данных имеет большое значение, учитывая временные ограничения для принятия решений в нефтегазовой отрасли. Современный подход к трассировке сейсмических горизонтов сводится к решению задачи сегментации с помощью сверточных нейронных сетей, которым на вход подается куб сейсмических амплитуд, на выходе получается куб вероятностей наличия сейсмического горизонта. Метод автоматического отслеживания сейсмических горизонтов, может сократить время, необходимое для интерпретации, а также повысить точность корреляции. Разработка методов автоматизации выделения геологических объектов, таких как

погребенные бары, рифы, русла и других седиментационных тел, способствует снижению субъективной ручной корреляции интерпретатора и сохранению временных затрат на производстве. В настоящее время в качестве характерной аномалии наиболее распространены речные системы, представленные каналами (руслами), которые представляют значительный интерес с точки зрения наличия углеводородного коллектора.

В основе технологии сверточных нейронных сетей (CNN) положено глубокое обучение, которое является передовой областью исследований. Оно представляет собой несколько скрытых слоев искусственных нейронных сетей. Для обучения нейронной сети, оказалось, эффективно использовать спутниковые снимки и атрибуты амплитуд отдельных частот, так как данные атрибуты являются на практике одними из основных для визуализации целевых объектов. Но для улучшения методики прогноза используются совокупность атрибутов, на которых лучше выделяются различные особенности осадочных тел в волновом поле на сейсмических горизонтальных сечениях. Для решения поставленной задачи необходимо, чтобы используемый алгоритм характеризовался высокой точностью решения. Кроме количества слоев, важным свойством искусственных нейронных сетей глубокого обучения является их архитектура [13-16].

Выводы

Рассмотрены проблемы автоматизации проведения донных сейсмических съёмок на глубокой воде. Показано, что самовсплывающие станции имеют преимущество при проведении гибридных съёмок. Рассмотрены несколько альтернативных методов автоматизации 3Д донной съёмки и стоящие на этом пути проблемы. Рассмотрены вопросы автоматизации выделения отражающих горизонтов при интерпретации сейсмических изображений с помощью искусственного интеллекта.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках госзадания Института Океанологии им. П.П. Ширшова РАН (тема № FMWE-2024-0026).

Список литературы:

1. Gorszczyk A., Brossier R., Metivier L.. Regional-scale FWI of wide-angle OBN data from a crude initial model using graph-space optimal transport // SEG Technical Program Expanded Abstracts – 2021 -: 707-711.
2. Denes Vigh, Xin Cheng, Kevin Lyons, Nigel Seymour, Eray Kocel and Zhenwen Pan Sparse-node regional study from acquisition to imaging // SEG Technical Program Expanded Abstracts – 2021-: 722-726.
3. Юров Ю.Г. Определение скоростной модели среды с помощью наблюдений отражённых и преломлённых волн//Технологии сейсморазведки. – 2009 - №3, С. 28-35
4. Beaudoin G. and Ross A.A. Field design and operation of a novel deep water, wide-azimuth node seismic survey // The Leading Edge -2007- Vol. 26: 494-503.
5. Ray A. Nolte B. and Herron. D. First nodal OBS acquisition from the Thunder Horse Field in the deep water of the Gulf of Mexico. SEG Technical Program Expanded Abstracts – 2004 -: 406-409.

6. Ильинский Д.А., Гинзбург А.А., Воронин В.В, Ганжа О.Ю., Манукин А.Б., Рогинский К.А. О создании цифровых донных сейсмических станций нового поколения: настоящее и взгляд в будущее. Геоэкология. Инженерная геология, гидрология, геокриология. РАН. – 2019. - No 2. С.87-101
7. Andrew McBarnet. Dipping into the seabed acquisition market // Upstream Online. -2016-
<https://www.upstreamonline.com/hc-technology/dipping-into-the-seabed-acquisition-market/1-1-1011999>
8. Hansen P. S. The future is at the bottom of the sea. // GeoExPro. - 2017. - Vol. 14, No 4
9. Plinskiy D.A. , Ganzha O. Y., Elnikov A. I., Roginskiy K.A.. Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation. «Морские технологии 2019» — Геленджик, Россия, 22-26 апреля 2019 г.
10. Brown I. Ocean Bottom Seismic: Robots on the Seabed // GeoExPro. 2021. - Vol. 18. No 1
11. Kombrink H. Dropping nodes from a supply vessel // GeoExPro - 2023.- Vol. 20. No 3
12. Подводный GPS на телеуправляемом необитаемом подводном аппарате: опыт использования. // Статья на сайте компании «Лаборатория подводной связи и навигации»
<https://www.unavlab.com/o-nas/articles/podvodnyj-gps-na-teleupravljaemom-neobitaemom-podvodnom-apparate-opyt-ispolzovaniya/>
13. Алексеева П.А., Калугин А.А., Кирьянова. Выделение палеорусел в отложениях тюменской свиты с использованием нейронной сети по данным сейсморазведки 3D // Геофизика. - 2022.- №3. С. 9-15.
14. Краснов Ф.В., Буторин А.В., Ситников А.Н. Автоматизированное обнаружение геологических объектов в изображениях сейсмического поля с применением нейронных сетей глубокого обучения // Бизнес-информатика. - 2018.- №2 (44). С. 7–16.
15. Приезжев И. И., Васильев М. А., Петренко Е. Н. Построение прогнозных карт эффективных газонасыщенных толщин по форме сейсмического сигнала на основе нейронных сетей Кохонен // Геофизика. - 2020. - №6. С. 49-54.
16. Hampson, D.P., Schuelke, J.S. and Quirein, J.A. Use of Multi Attributes Transform to Predict Log Properties from Seismic Data // Geophysics. – 2001. - Vol. 66, 230-236.

УДК 551.46

Рубрика 37.25.03

КАК ПОСТРОИТЬ СОВРЕМЕННУЮ ПЛАТФОРМУ УПРАВЛЕНИЯ
АВТОМАТИЧЕСКИМ НЕОБИТАЕМЫМ ПОДВОДНЫМ ЗОНДОМ-
ПРОФИЛОГРАФОМ?

BUILDING A MODERN CONTROL PLATFORM FOR AN AUTOMATIC UNMANNED
UNDERWATER PROFILER

Кочетов Олег Юрьевич¹, Волков Сергей Васильевич¹, Островский Александр Григорьевич¹

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

Kochetov Oleg Yurievich¹, Volkov Sergey Vasilievich¹, Ostrovskii Alexander Grigorievich¹

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Введение

Автоматизация океанологических измерений – это важная и актуальная задача, решение которой должно обеспечить получение значительно большего объема высококачественных данных об океане при многократно меньших затратах на проведение измерений. В перспективе данные должны поступать преимущественно в оперативном режиме, то есть должен осуществляться всеобъемлющий мониторинг морской среды. Арсенал технических средств автоматизированных океанологических измерений постоянно расширяется. В этом контексте, прежде всего, стоит упомянуть глобальную программу Ocean Observatories Initiative [1]. Эта программа объединяет в наблюдательную сеть более чем 900 измерителей, основная часть которых передает данные в режиме реального времени. В состав наблюдательной сети входит большое количество заякоренных мобильных профилирующих аппаратов.

В России создано два типа зондов-профилографов для заякоренных станций: это аппараты серии «Аквалог», которые интенсивно применяются для исследований на черноморском гидрофизическом полигоне ИО РАН [2] и привязной зонд-профилограф «Винчи» (Рис.1) со встроенной лебедкой [3] особенности управления которой и будут более подробно рассмотрены в данной статье. На этих примерах легко выделить наиболее ярко проявляющиеся тенденции развития зондов-профилографов, да и в целом техники для океанологических исследований: миниатюризацию и энергоэффективность, автоматизирование рутинных операций, интеграцию в существующую информационную среду и оперативность доступа к получаемым данным. С точки зрения пользователя количество и качество получаемых данных растет, время доступа к ним снижается и главное - пользоваться приборами становится проще. При этом усложняется как разработка самого прибора, так и технических средств, которые обеспечивают взаимодействие с пользователем. Если раньше можно было говорить об интерфейсе «человек-прибор», то теперь это уже многокомпонентная конструкция, которую мы далее будем называть платформой управления.



Рис.1. Привязной зонд-профилограф "Винчи" во время испытаний на оз. Глубокое

Разработка аппаратно-программной платформы управления подводным аппаратом

Платформа управления состоит из нескольких слоев (Рис.2.), каждый из которых предоставляет дополнительные возможности взаимодействия с прибором и получаемыми данными. Базовый слой – это электроника и встроенное программное обеспечение, они составляют основу функционала прибора. Говоря иными словами, это то, что работает автоматически, когда прибор находится под водой и то, что обеспечивает связь прибора с внешним миром. Второй слой – служебный, это программное обеспечение пользователя, необходимое для диагностики и обслуживания прибора в лаборатории, а также программирования перед постановкой в полевых условиях. Третий слой – сервисный, он включает в себя промежуточное серверное программное обеспечение. Это набор программ, которые обеспечивают получение, предварительную обработку и хранение поступающих от приборов данных. Наконец, самый верхний, четвертый слой – прикладной, является веб-интерфейсом, с помощью которого оператор следит за поступающей от прибора информацией: телеметрией и данными измерений, а также формирует управляющие команды.

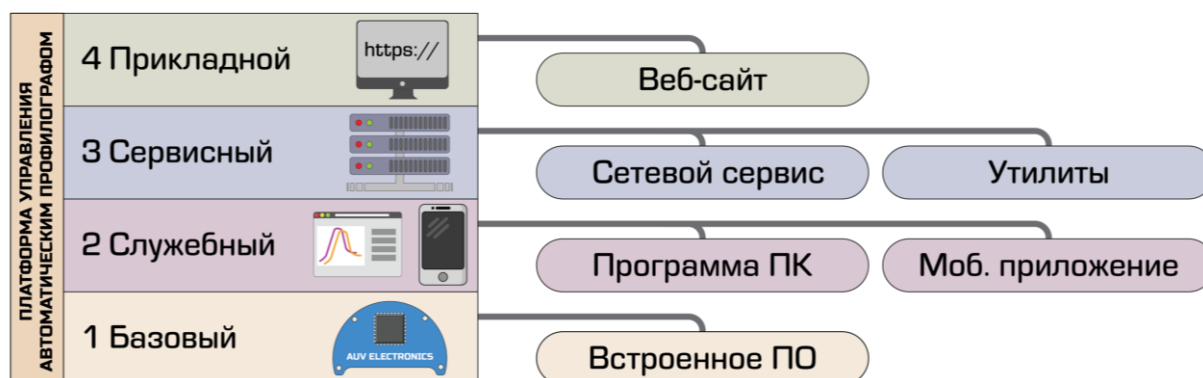


Рис.2. Структура платформы управления автоматическим зондом-профилографом

Можно провести связи отмеченных выше тенденций развития техники с каждым из слоёв платформы управления.

Так, миниатюризация и энергоэффективность напрямую влияют на базовый слой, то есть на состав и функциональность электроники прибора. Профилограф «Винчи» использует унифицированное аппаратно-программное ядро, разработанное в ИО РАН специально для автоматических профилографов различных типов. Ядро основано на производственном микроконтроллере общего назначения STM32F427, и предоставляет широкий выбор интерфейсов для подключения периферийных устройств: до 5 двигателей постоянного тока, 4 последовательных порта стандарта RS-232, 4 порта для аналоговых датчиков, две шины I2C, средства беспроводной связи стандартов Bluetooth и LTE/GSM, накопитель данных формата microSD. Встроенное программное обеспечение электронного ядра написано на языке C++ с использованием операционной системы реального времени FreeRTOS. Оно построено по принципу модульного фреймворка для того, чтобы предоставлять разработчику готовый каркас многопоточной программы, в которой уже реализован весь низкоуровневый функционал [4]. Это позволяет сократить требуемое время для модификаций встроенной программы управления зондом-профилографом и разработки новых программ для приборов других типов, основанных на этом электронном ядре. Примером может служить разрабатываемый зонд-профилограф с гидравлической системой изменения собственной плавучести [5].

Производительности и ресурсов этого аппаратно-программного ядра более, чем достаточно для того, чтобы поддерживать запись нескольких потоков данных от комплекта измерительных датчиков на встроенный накопитель, упаковку этих данных и эффективное взаимодействие с внешними устройствами через беспроводные интерфейсы. Отсутствие необходимости кабельных подключений для взаимодействия с прибором значительно упрощает процедуры обслуживания, диагностики и программирования перед постановкой.

Решение задач в платформе управления происходит в служебном слое. Если вспомнить приборы конца 80-х годов прошлого века, то зачастую для взаимодействия с ними приходилось создавать уникальные интерфейсные решения. Распространение портативных персональных компьютеров революционно изменило подход к взаимодействию с техникой: для этого стали применяться программы, работающие на ПК. Однако за последние 20 лет появились и широчайше распространились ультра-компактные носимые устройства совершенно нового класса, обладающие производительностью, сравнимой с персональными компьютерами начала XXI века: смартфоны и планшеты. Современную информационную среду уже невозможно представить без этих универсальных устройств, в них так или иначе реализованы практически все аспекты информационного взаимодействия, необходимого людям. Мобильные приложения позволяют вывести удобство работы с аппаратурой на новый уровень, но есть и ограничения, связанные с размером дисплея и скудностью средств ввода информации. Поэтому, в служебном слое платформы управления профилографа «Винчи» находятся два компонента: программа для ПК и приложение для смартфона. Программа для ПК применяется для диагностики и обслуживания прибора в лабораторных условиях, позволяет получить исчерпывающую картину состояния аппарата, задать настройки и провести испытания (Рис.3). Приложение для смартфона дает возможность провести экспресс-проверку прибора перед постановкой и запрограммировать параметры миссии в полевых условиях, где использование полноразмерного ноутбука обычно бывает не удобным. Кроме того, во время автоматической работы прибора приложение выполняет задачу мониторинга и показывает уведомления в случае получения аварийных сигналов от зонда или потери связи с сервером. Обе программы написаны на языке программирования Java, что позволяет использовать в них общий код для работы с протоколом передачи данных, который используется для непосредственной связи с прибором.

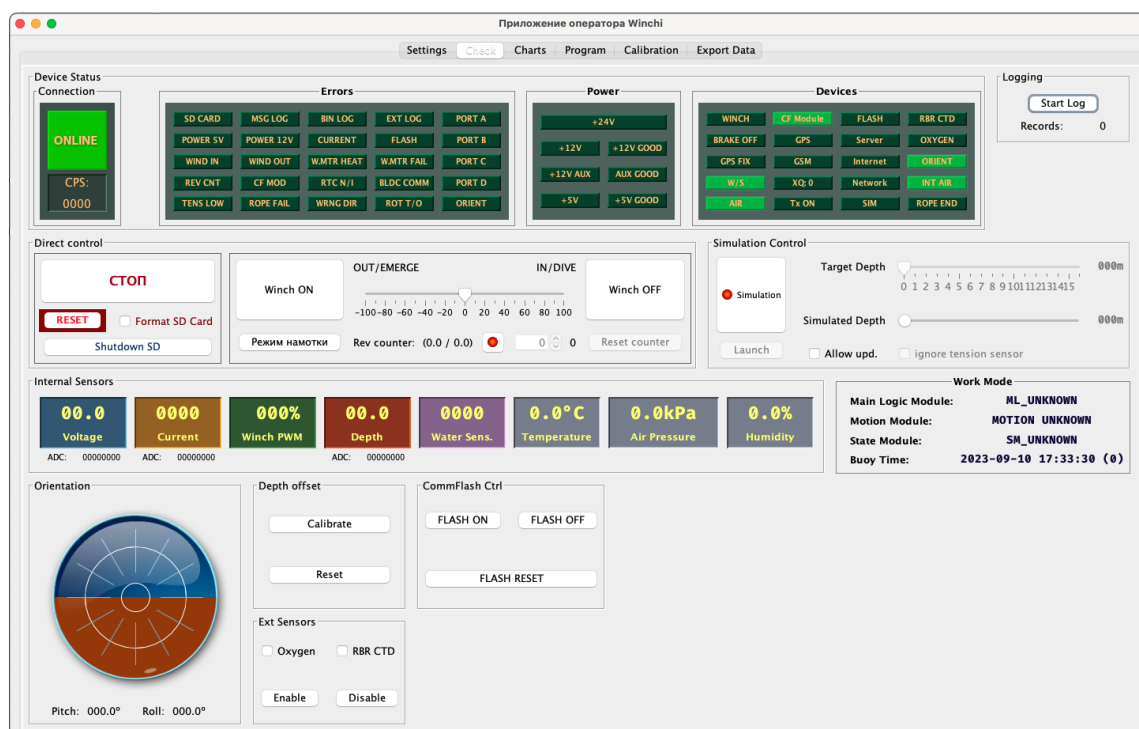


Рис.3. Внешний вид программы диагностики и обслуживания

Во время автоматической работы профилограф «Винчи» в циклическом режиме регулярно поднимается на поверхность воды и передает телеметрию и данные измерений. Для этого используется транспортный протокол TCP/IP через сеть сотовой связи. Разумеется, такая передача данных невозможна без серверной инфраструктуры, которая составляет сервисный слой платформы управления. Роль сервера может исполнять практически любой компьютер, имеющий постоянное подключение к сети Интернет и внешний IP-адрес. Сейчас для испытаний мы пользуемся небольшой виртуальной машиной, арендованной в одном из доступных хостингов, но планируем перенести все на выделенный сервер, размещенный на серверной площадке ИО РАН.

Главный компонент набора серверного программного обеспечения – это сетевой сервис, принимающий входящие соединения. Прибор передает телеметрию и файлы с результатами измерений по специальному протоколу, который гарантирует целостность полученных данных при передаче файлов отдельными фрагментами, что очень полезно при работе с неустойчивыми каналами связи, т.к. позволяет докачивать не переданные части файлов после восстановления соединения, а не начинать передачу заново. Так же в рамках этого протокола реализован канал передачи данных от сервера к прибору, по которому проходят команды управления. Это позволяет гибко перестраивать параметры автоматической работы, например, изменить интервал между циклами «всплытия/погружения» или поменять конфигурацию измерительных инструментов. Сетевой сервис поддерживает одновременную работу с несколькими приборами.

Остальные компоненты сервисного слоя платформы управления – это небольшие утилиты, автоматизирующие рутинные операции предварительной обработки данных: распаковку полученных файлов и преобразование данных в общепринятый формат CSV, а также для генерирования команд, которые будут отправлены прибору. Все программы сервисного слоя написаны на языке программирования C++, что позволяет использовать часть кода совместно со встроенным программным обеспечением самого прибора в части протоколов связи и форматов данных. Хранение данных обеспечено простыми средствами файловой системы сервера в структурированном дереве каталогов, однако в будущем, вероятно, потребуется добавить в сервисный слой платформы управления полноценную базу данных.

Трех перечисленных слоев: базового, служебного и сервисного уже достаточно для работы с прибором, но такую работу едва ли можно назвать комфортной, т.к. для взаимодействия с сервером приходится использовать подключение через терминал, в режиме командной строки. Пользоваться таким решением может только специалист с соответствующей квалификацией, поскольку нарушить что-либо в этом режиме очень легко. Для обычных пользователей доступ к такому режим должен быть ограничен, поэтому в платформе управления есть четвертый слой – прикладной. Он представляет из себя веб-сайт, на котором можно оперативно получать доступ к телеметрии и данным измерений, поступающим от прибора, а также формировать команды управления. Веб-сайт работает на базе широко известного фреймворка Django, который использует язык программирования Python. Страницы сайта построены с применением очевидной связки из HTML, CSS и JavaScript.

Не все возможности сайта должны быть доступны любому посетителю, поэтому в нем реализованы три уровня доступа: гостевой, пользовательский и административный. Гостям доступны только открытые данные, например, телеметрия и усредненные профили данных измерений (данные низкого разрешения). Пользователи уже получают возможность просматривать и скачивать полные наборы данных измерений. Отправлять прибору управляющие команды, регистрировать в системе новые приборы и активные миссии, а также разрешать публикацию открытых данных могут только администраторы.

Описанные четыре слоя аппаратуры и программного обеспечения образуют полноценное решение для управления зондом-профилографом, соответствующее требованиям сегодняшнего дня. При разработке подобной системы необходимо уже на этапе проектирования учитывать широкий набор технологий и компетенций, которые потребуются для её реализации.

Заключение

Ключевыми составляющими успешного применения автоматических зондов-профилографов на сегодняшний день являются: снижение требований к техническому обеспечению и затратам на установку и подъем, упрощение технического обслуживания и удобство использования. Эффективность таких приборов значительно зависит от аппаратных и программных средств, которые должны обеспечить быструю подготовку прибора к работе, получение данных измерений в режиме близком к реальному времени и возможность оперативного управления прибором во время выполнения миссии. Ориентируясь на эти требования, в ИОРАН разработаны электронное ядро и комплекс программного обеспечения, образующие вместе единую платформу для создания автоматических зондов-профилографов, использующих для своего перемещения электромеханический привод со шкивом, подводную лебедку, и балластную систему переменного объема на подобие глайдера. Первым устройством, в котором в полной мере реализован потенциал этой технологии, является привязной зонд-профилограф с подводной лебедкой «Винчи».

Финансирование

Работа выполнена по теме государственного задания FMWE-2021-0010.

Список литературы:

1. <https://oceanobservatories.org/>

2. А. Г. Островский, А. Г. Зацепин, В. А. Соловьев [и др.]. Автономный мобильный аппаратно-программный комплекс вертикального зондирования морской среды на заякоренной буйковой станции // *Океанология*. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 259. – DOI 10.7868/S0030157413020147. – EDN PXLGLX.
3. A. G. Ostrovskii, O. Y. Kochetov, V. V. Kremenetskiy [et al.]. Automated Tethered Profiler for Hydrophysical and Bio-Optical Measurements in the Black Sea Carbon Observational Site // *Journal of Marine Science and Engineering*. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – DOI 10.3390/jmse10030322. – EDN ITVPXR.
4. О. Ю. Кочетов, А. Г. Островский, С. В. Волков, В. М. Ольшанский. Унифицированная аппаратно-программная платформа системы управления автономных подводных профилирующих аппаратов // *Подводные исследования и робототехника*. – 2018. – № 1(25). – С. 59-66. – EDN UTGUCG.
5. А. Г. Островский, А. Г. Зацепин, Д. А. Швоев [и др.]. Автоматический подледный зонд // *Океанология*. – 2020. – Т. 60, № 6. – С. 978-986. – DOI 10.31857/S0030157420060106. – EDN BKWIUB.

УДК 532.591

Рубрика 37.25.29

АПРОБАЦИЯ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО МЕТОДА МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ
ЛЕДОВОГО ПОКРОВА В АРКТИКЕ

TESTING OF A SEISMOACOUSTIC METHOD FOR ICE COVER PARAMETERS
MONITORING IN THE ARCTIC

Преснов Дмитрий Александрович¹, Вакарчук Роман Николаевич¹, Жостков Руслан Александрович¹, Овсяченко Александр Николаевич¹, Прокопович Игорь Валерьевич², Тимофеева Анна Борисовна³, Шуруп Андрей Сергеевич⁴

¹*ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва*

²*ИЗМИРАН, Троицк*

³*ААНИИ, Санкт-Петербург*

⁴*МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва*

Presnov Dmitriy A.¹, Vakarchuk Roman N.¹, Zhostkov Ruslan A.¹, Ovsuchenko Alexander N.¹, Prokopovich Igor V.², Timofeeva Anna B.³, Shurup Andrey S.⁴

¹*Schmidt IPE of the RAS, Moscow*

²*IZMIRAN, Troitsk*

³*AARI, Saint Petersburg*

⁴*MSU M. V. Lomonosov, Moscow*

Введение

Стремительный рост деловой активности на шельфе арктических морей, сопровождающийся увеличением объема перевозок по Северному морскому пути, в сочетании с повышенным интересом правительственных и общественных организаций к состоянию морского ледового покрова как индикатора глобальных климатических изменений, предопределил бурное развитие технической и методической базы ледовых наблюдений. При этом, ключевую роль в параметрах ледяного покрова замерзающих водоемов мирового океана играет толщина льда, а ее измерение является одной из наиболее важных и сложных задач. В наши дни разработано и широко используется в полевых исследованиях несколько методов [Алексеева и др., 2021]: 1) бурение льда; 2) методы эхолокации с использованием сонаров на подледных буях и лодках; 3) электромагнитные методы; 4) визуальные и телевизионные наблюдения с борта судов и ледоколов, осуществляющих ледовое плавание. Несмотря на большое разнообразие подходов к оценке толщины льда все они не лишены недостатков. Так большинство контактных методов подразумевают непосредственное присутствие человека, что существенно усложняет процедуру, учитывая в том числе суровые погодные условия Арктики. Дистанционные методы сталкиваются с трудностями в облачную погоду и не всегда могут обеспечить высокое пространственное разрешение при измерениях. В связи с этим, перспективным является совместное использование спутниковых наблюдений и результатов «наземных» измерений, в качестве которых могут выступать сейсмоакустические данные, содержащие информацию о характеристиках упругих волн, распространяющихся в ледовом покрове.

Схема эксперимента

Материалом для данной работы послужили хоть и непродолжительные, но достаточно интересные сейсмоакустические наблюдения на морском льду архипелага Земля Франца-Иосифа в мае 2023 года. Отметим, что параметрам льда в районе ЗФИ в последние года уделяется повышенное внимание, а вопрос изменения ледовитости является достаточно актуальным [Матишов и др., 2017; Шапкин и др., 2021]. При этом, изучение колебаний ледового покрова при помощи многоканальной измерительной системы регистрации в столь высоких северных широтах было предпринято впервые. Основу измерительной системы составляла сейсмическая станция DAQlink4, которая была настроена на функционирование в режиме непрерывного мониторинга, причем синхронизация с мировым временем обеспечивалась GPS-приемником Garmin 16x HVS. К станции был подключен электрический кабель, содержащий 24 приемника расположенных на расстоянии пять метров друг от друга (рис. 1). В качестве приемников использовались вертикальные геофоны GS-ONE LF с собственной частотой 4.5 Гц, чувствительность которых составляет ~ 100 В/(м/с). Дополнительно для контроля окружающей обстановки применялся видеорегиистратор.



Рис 1. Место размещения измерительной системы (желтым) и ледоисследовательского профиля (фиолетовым) на спутниковом снимке.

Приемная система была размещена на припайном льду в акватории бухты Северная о. Земля Александры на расстоянии около 500 метров от берега в точке с координатами $80^{\circ}46'2''$ СШ, $47^{\circ}39'55.2''$ ВД. Поблизости расположено место, где организовывается причал. Датчики устанавливались таким образом, чтобы сформировать две линейные группы, расположенные под прямым углом, причем одна из групп включала 13 геофонов, а другая 11 (рис. 1). Соответственно длина каждой из линий составила 60 и 50 метров. Такая схема наблюдений обеспечивает равномерное азимутальное покрытие в задаче обнаружения источника. Отметим, что по причине наличия на льду слоя снега толщиной до 20 см, а также воды на границе льда и снега, геофоны устанавливались не прямо в лед, как это было запланировано изначально, а в плотный снег максимально близко к поверхности льда, после чего присыпались снегом.

Таким образом, была получена непрерывная запись сейсмоакустических шумов различного происхождения, формирующихся в морском льду. Продолжительность измерений составила 29.5 часов с 01:40 18 мая по 07:10 19 мая местного времени.

Данные и методы

Для определения параметров льда в пределах измерительного профиля использовались прямые измерения – бурение лунок и замеры толщины льда, выбуривание ледовых кернов и определение их плотностных свойств вдоль профиля (рис. 1). В районе базы «Омега» в прибрежной части бухты Северной наблюдался достаточно ровный припайный лед, без видимых следов активных динамических процессов в виде крупных наслоений и торошений. Тем не менее под толстым слоем снега ощутимо находились как более ровные, так и торосистые участки, которые, очевидно, сформировались еще на ранних этапах становления припая. В зоне видимости находилось несколько обломков и кусков айсбергов, а у берега при выходе на припай в обоих местах, где проводились ледоисследовательские работы, обнаруживалась приливная трещина. Измерение превышения поверхности льда над поверхностью воды оказалось затруднительным, поскольку собственно превышение было зафиксировано всего в нескольких точках, в пределах 1-2 см. В остальных случаях наблюдался эффект, при котором из только что пробуренной лунки на поверхность льда бурно вырывалась вода, просачиваясь в окружающий снег. Схема полученных ледовых разрезов по выполненным измерениям приведена на рис. 2.

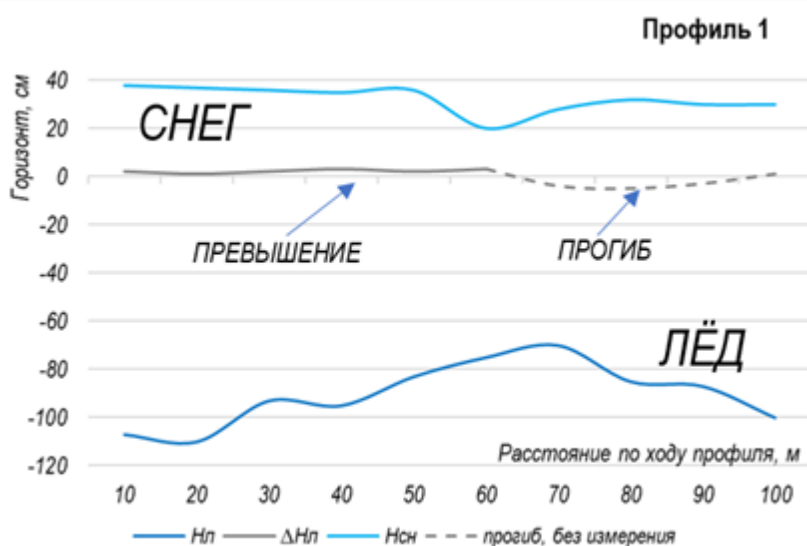


Рис 2. Полученная прямыми измерениями схема ледоисследовательского профиля.

В дальнейшем мы будем использовать усредненные оценки значений толщины $h_{ист} = 0.9$ м и плотности $\rho_{ист} = 860$ кг/м³ льда, полученные для начала суток 18 мая. Отметим также, что толщина снега в среднем составляла 0.32 м. Температура воздуха контролировалась при помощи электронного термометра, установленного внутри корпуса гео-гидроакустического буя, который был расположен в нескольких километрах от ледового профиля.

Распространение упругих волн в ледовом покрове океана исследуется на протяжении многих десятилетий [Stein et al., 1998]. Использование сейсмоакустических волн позволяет оценить толщину льда h , а также его механические свойства – плотность ρ , модуль Юнга E и коэффициент Пуассона μ . Несмотря на всю свою привлекательность, сейсмоакустический мониторинг характеристик льда редко реализуется на практике, в основном по причине необходимости специального источника сигнала. Цель настоящей работы показать возможность дистанционного мониторинга характеристик ледового покрова на основе анализа фоновых шумовых – то есть в пассивном режиме. На рис. 3 сопоставляется

спектральная плотность мощности (после учета приборной характеристики) сейсмоакустического шума, формирующегося в ледовом покрове, который был зарегистрирован в 2023 г. при помощи геофона (слева) и широкополосным сейсмометром (справа) в 2021 г. на льду в заливе Дежнёва. Можно сделать вывод, что простого геофона достаточно для регистрации интенсивных шумов льда, а специальные широкополосные станции [Собисевич и др., 2021] могут быть упрощены.

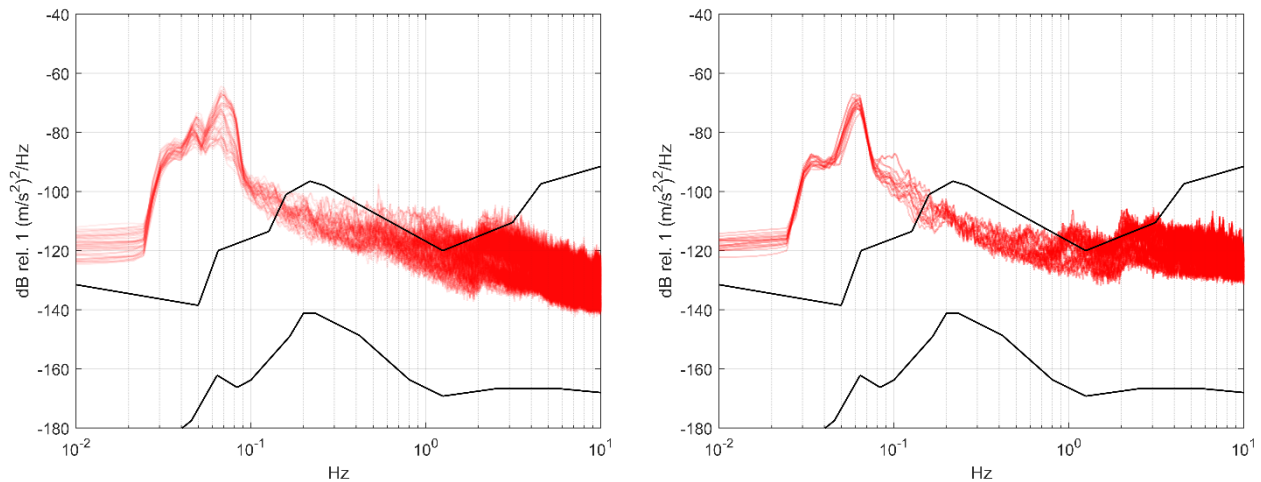


Рис 3. Сравнение спектральных параметров сейсмоакустического шума, регистрируемого на поверхности льда геофоном (слева) и широкополосным сейсмометром (справа).

Для ледовой пластины толщины h , лежащей на жидком полупространстве, на низких частотах f сейсмоакустическое поле формируется преимущественно тремя модами: продольной модой, поляризованной вдоль направления распространения волны, поперечной модой с горизонтальной поляризацией вдоль поверхности пластины и изгибно-гравитационной модой. При этом продольная и поперечные моды практически не обладают дисперсией в рассматриваемом частотном диапазоне и распространяются со скоростями продольных и поперечных волн в безграничном упругом пространстве; в то же время для изгибно-гравитационной волны дисперсия проявляется заметно. Характерный вид временной зависимости изгибно-гравитационной волны начинается с высокочастотной части, которая приходит раньше, и завершается медленно распространяющейся низкочастотной составляющей поля этой моды (рис. 4). Аналитическая связь между фазовыми скоростями мод и характеристиками льда в виде дисперсионного уравнения [Преснов и др., 2014], позволяет решить прямую задачу расчета модельных частотных зависимостей фазовых скоростей $c(f)$ в зависимости от параметров льда h , ρ , E и μ . Решение прямой задачи, в свою очередь, используется для восстановления характеристик льда за счет выбора тех их значений, которые обеспечивают наилучшее совпадение численно рассчитанных и экспериментально измеренных фазовых скоростей в рассматриваемом частотном диапазоне.

Результаты

В рассматриваемой схеме оценки параметров ледового покрова используются одноканальные датчики, регистрирующие вертикальную компоненту сейсмического шума, соответственно основной вклад в регистрируемое поле дает изгибно-гравитационная волна, так как для нее характерна эллиптическая поляризация. На первом этапе исследования для определения параметров ледовой пластины сейсмоакустическим методом с использованием многоканального приема применялся специально сгенерированный сигнал. Однако в общем

случае источником такого сигнала может служить, например льдотрясение естественного происхождения. На рис. 4 слева показаны сигналы, зарегистрированные 13 геофонами, расположенными на одной оси с источником в порядке удаленности от него. Для оценки дисперсионной зависимости фазовой скорости использовался метод f-k анализа [Преснов и др., 2021], результаты которого представлены на рис. 4 справа. Белыми точками отмечены пикированные в автоматическом режиме значения фазовой скорости $c(f)$ изгибно-гравитационной моды, можно сделать вывод, что ошибка полученных оценок не превышает 3% в среднем по рассматриваемому частотному диапазону.

Полученные значения $c(f)$ использовались для решения обратной задачи, в основе которой лежит минимизация квадратичного функционала невязки, который вычислялся стандартным

образом:
$$\chi_c = \sqrt{\frac{\sum_i |c(f_i) - c_{\text{мод}}(f_i; h, \rho, E, \mu)|^2}{\sum_i c^2(f_i)}}$$
,

где $c(f_i)$ – фазовая скорость, оцененная из экспериментальных данных; $c_{\text{мод}}(f_i; h, \rho, E, \mu)$ – результаты численного моделирования, которые зависят от искомых параметров льда h, ρ, E, μ ; f_i – дискретизированные значения частот в рассматриваемой полосе. В качестве метода решения обратной задачи использовался алгоритм, разработанный нами для инверсии групповой скорости, получаемой в результате анализа пассивных экспериментальных данных. В случае использования фазовых скоростей, как в настоящей работе, задача несколько упрощается так как снимается неоднозначность вычисления модельной групповой скорости из дисперсионного уравнения. При этом, так как c нельзя выразить из дисперсионного уравнения аналитически, то искать решение приходится в неявной форме, используя, например, стандартные итерационные методы, что требует дополнительных временных затрат.

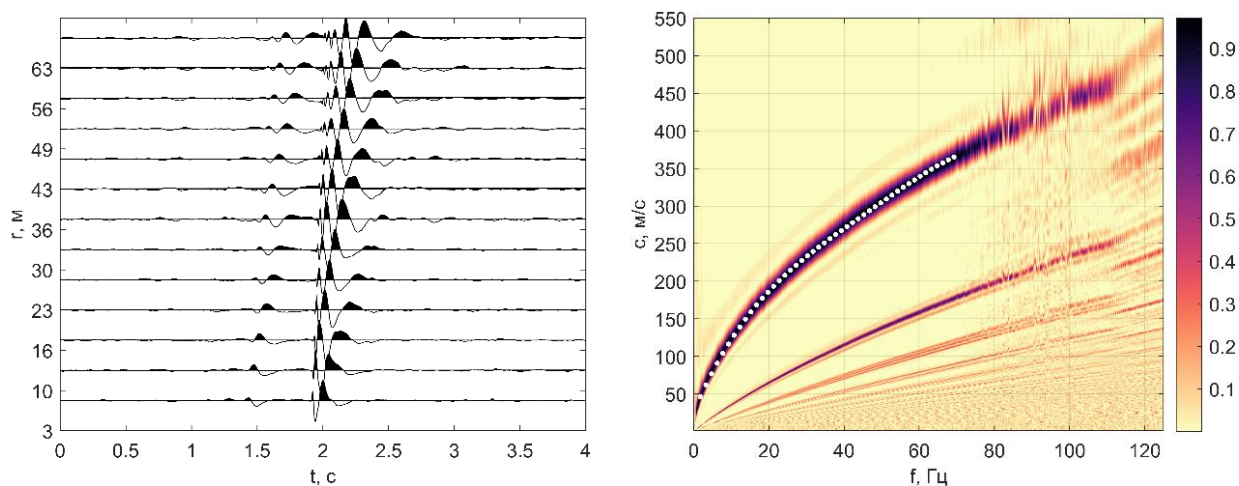


Рис. 4. Сейсмограмма искусственного сигнала, зарегистрированная сейсмической косой на поверхности льда (слева) и результат применения к этим данным f-k анализа (справа).

Итак, для оценки параметров ледового покрова использовался алгоритм Метрополиса-Гастингса, который позволяет покрыть достаточно большое пространство неизвестных параметров с минимальной априорной информацией о модели. Первым этапом решения обратной задачи является параметризация модели среды – то есть выбор параметров, подлежащих оценке, и задание множества возможных значений с целью ограничения области

поиска решения. На основе данных литературных источников [Богородский, 1958; Смирнов и др., 2010; Марченко и др., 2020; Ковалев и др., 2020] были определены диапазоны изменений параметров льда h, ρ, E, μ , которые наблюдались при натурных исследованиях (см. табл. 1).

Таблица 1. Используемые диапазоны значений восстанавливаемых параметров модели, по литературным данным и результаты решения обратной задачи

	Минимальное значение	Максимальное значение	Результат восстановления
Толщина льда, h , м	0.5	1.5	0.69 ± 0.13
Плотность, ρ , кг/м ³	700	1000	$(8.7 \pm 0.9) \cdot 10^2$
Модуль Юнга, E , ГПа	2	15	6 ± 3
Коэффициент Пуассона, μ	0.1	0.5	0.25 ± 0.12

Алгоритм запускался параллельно для шести различных начальных точек, выбранных случайным образом для контроля сходимости метода решения обратной задачи. Для изучения всего пространства моделей генерировалась достаточно обширная выборка, содержащая $N = 150000$ реализаций. Чтобы оценить достаточность числа реализаций в рассматриваемой задаче, были рассчитаны зависимости средних значений толщины льда от количества элементов выборки $K = 1 \div N$ используемых при вычислении среднего. После усреднения уже по $K \approx 50000$ среднее значение толщины льда слабо изменяется для всех реализаций марковских процессов, то есть рассматриваемого количества «испытаний» $N = 150000$ достаточно для получения стационарного состояния марковской цепи. Таким образом, был получен обширный набор параметров модели h, ρ, E, μ удовлетворительно описывающий входные данные, в качестве которых использовались экспериментально измеренные дисперсионные кривые фазовой скорости изгибно-гравитационной моды $c(f)$. По полученной выборке значений h, ρ, E, μ методами статистического оценивания были определены средние значения и среднеквадратичные отклонения искомых параметров (см. табл. 1).

Заключение

Таким образом, применение многоканальной сейсмоакустической системы на льду бухты Северная о. Земля Александры позволило в активном режиме оценить параметры ледового покрова, соответствующие средним значениям для трассы длиной 60м, вдоль которой были установлены датчики. Полученные оценки в пределах ошибок согласуются с результатами прямых контактных измерений и удовлетворяют литературным данным. Выполненные продолжительные измерения на поверхности ледового покрова позволят в дальнейшем применить пассивный подход, основанный на оценке скоростей мод путем анализа фоновых сейсмоакустических шумов. В этом случае количество точек, в которых необходимо выполнить инверсию и определить параметры среды существенно возрастет. Полученные на первом этапе в результате решения многопараметрической обратной задачи данные будут использоваться в дальнейшем в качестве исходных для построения более детальной модели ледового профиля. Развиваемая технология мониторинга физических параметров ледового

покрова в автономном – не требующем участия человека режиме, представляется достаточно перспективной, в особенности для применения в крайне суровых условиях Арктики.

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам национального парка «Русская Арктика», Департаменту Экспедиционной деятельности РГО и лично Сергею Анатольевичу Чечулину за поддержку и помощь в организации полевых исследований в высоких широтах Арктики.

Финансирование

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 22-77-00067.

Список литературы:

1. Алексеева Т.А., Фролов С.В., Сероветников С.С. Обзор методов и основных результатов измерения толщины морского льда в Арктике // *Российская Арктика*. 2021. № 1(12). С. 33-49.
2. Богородский В.В. Упругие характеристики льда // *Акустический журнал*. 1958. Т. 4. № 1. С. 19-23.
3. Смирнов В.Н., Миронов Е.У. Исследования прочности, морфометрии и динамики льда в инженерных задачах при освоении шельфа в замерзающих морях // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2010. №2 (85). С. 5-15.
4. Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Тубанов Ц.А., Черемных А.В., Загорский Д.Л., Котов А.Н., Нумалов А.С. Байкальский сейсмоакустический эксперимент // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. 2021. Т. 496. № 1. С. 82-86.
5. Марченко А.В., Карулин Е.Б., Чистяков П.В. Экспериментальное определение упругих характеристик морского ледяного покрова // *Научно-технический сборник Вести газовой науки*. 2020. № 3(45). С. 129-140.
6. Матишов Г.Г., Жичкин А.П. Современные тенденции изменения ледовитости в районе архипелага Земля Франца-Иосифа // *Доклады Академии наук*. 2017. Т. 472. № 6. С. 708-711.
7. Ковалев С.М., Бородкин В.А., Колабутин Н.В., Ньюбом А.А., Шиманчук Е.В., Шиманчук Е.В. Основные физические и механические характеристики льда по результатам экспедиции "Трансарктика-2019" // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020. Т. 66. № 3. С. 293-320.
8. Преснов Д.А., Жостков Р.А., Гусев В.А., Шуруп А.С. Дисперсионные зависимости упругих волн в покрытом льдом мелком море // *Акустический журнал*. 2014. Т. 60. № 4. С. 426-436.
9. Тихоцкий С.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Использование низкочастотных шумов в пассивной сейсмоакустической томографии дна океана // *Акустический журнал*. 2021. Т. 67. № 1. С. 107-116.
10. Шапкин Б.С., Рубченя А.В., Иванов Б.В., Ревина А.Д., Богрянцев М.В. Многолетние изменения ледовитости в районе архипелагов Шпицберген и Земля Франца-Иосифа. Лёд и Снег. 2021. № 61(1). С. 128-136.
11. Stein P.J., Euerle S.E., Parinella J.C. Inversion of pack ice elastic wave data to obtain ice physical properties // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N. C10. P. 21,783-21,793.

УДК 550.831.015: 550.831.3: 528.27

Рубрика 37.31.23

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ
ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ

ON THE POSSIBILITY OF USING GLOBAL MODELS OF THE EARTH'S
GRAVITATIONAL FIELD IN THE ARCTIC

Михайлов Павел Сергеевич^{1,2}, Конешов Вячеслав Николаевич^{1,2}

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ, Владимир, Россия)

Mikhailov Pavel Sergeevich^{1,2}, Koneshov Vyacheslav Nikolayevich^{1,2}

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

² Federal state budgetary educational foundation of higher education «Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletov», Vladimir, Russia

Введение

Рост точности и разрешающей способности современных глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ) открывает новые возможности для их применения. В Мировом океане детальность модельных данных обеспечивается методом спутниковой альтиметрии. Поэтому основные погрешности в этих данных связаны с особенностями выполнения и обработки альтиметрической измерений.

Точность альтиметрии как глобального метода определения аномалий силы тяжести (АСТ) зависит от характера подстилающей поверхности акватории. Сезонные, климатические и приливные изменения уровня моря создают помехи в данных. Кроме того на достоверность данных влияют также течения и, конечно, наличие ледового покрова.

Для подавления шума от совокупности этих факторов применяются методы фильтрации данных, с параметрами, меняющимися в зависимости от уровня зашумления набора входящих данных. Такая фильтрация подавляет наиболее амплитудные реальные АСТ. Проведенное масштабное исследование по сравнительной оценке модельных данных с высокоточными съемками над различными структурами Мирового океана показало, что погрешности основных современных моделей ГПЗ на открытых акваториях зависят только от величины полного градиента поля и не зависят от широты [Михайлов и др., 2022].

В Арктике ввиду ее труднодоступности ценность глобальных данных о параметрах АСТ выше и актуальней. Однако часть акватории Северного Ледовитого океана периодически или постоянно закрыты льдом, что значительно ограничивает возможности метода спутниковой альтиметрии. Поэтому в Арктике, в вопросе точности глобальных моделей, появляется фактор широты: наличие сезонного и постоянного льда резко повышает погрешность альтиметрии и, как следствие, модельных данных.

На рисунке 1 показан пример увеличения погрешностей некоторых известных моделей ГПЗ относительно морских съемок в разных широтах над похожими структурами дна океана с максимальным полным градиентом аномального поля в пределах 3-5 мГал/км.

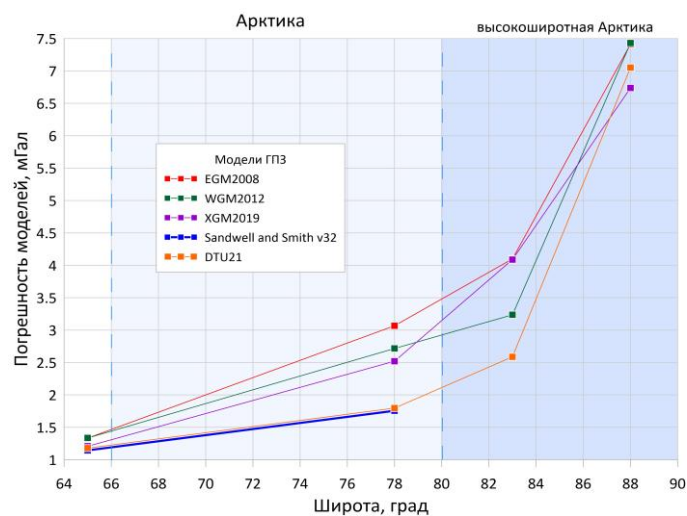


Рис 1. Погрешности современных моделей ГПЗ относительно морских съемок в разных широтах над похожими структурами дна океана с градиентом аномального поля в 3-5 мГал/км.

Как видно из рисунка 1 все рассмотренные модели в Арктике с увеличением широты значительно теряют в точности представления АСТ. Поэтому вопрос практической оценки модельных данных именно в Арктике и, особенно, в ее высоких широтах, является важным и требует отдельного рассмотрения.

Наиболее эффективным способом изучения характеристик модельных данных о ГПЗ является сравнение этих данных с площадными морскими съемками. Главная особенность и проблема получения таких оценок в Арктике заключается в отсутствии возможности выполнять площадную съемку на акваториях закрытых льдом. Даже в областях Северного Ледовитого океана, где в летний период ледовый покров отступает, остаются отдельные айсберги и дрейфующие ледовые поля, создающие дополнительные препятствия для геофизических судов и, следовательно, привнося дополнительную составляющую погрешности в результаты морских съемок.

Поэтому основной способ оценки модельных данных в Арктике – это использование систем коротких профилей, выполненных над определенными структурами, или отдельных протяженных профилей выполненных вдоль меридиана (субмеридиональные) или вдоль параллели (субширотные). В данной работе рассмотрены погрешности наиболее актуальных глобальных моделей относительно таких профильных измерений в высоких широтах [Соколов и др., 2016]. Задача исследования заключается в выявлении фактических погрешностей каждой модели и определение **наиболее достоверных** из них в Арктическом регионе. Рассмотрены модели: EGM2008 [Pavlis et al., 2012], WGM2012 [Balmino et al., 2012], XGM2019 [Zingerle et al., 2020], SGG-UGM-2 [Wei et al., 2020], Sandwell and Smith [Sandwell et al., 2014] и DTU21 [Andersen et al., 2012].

Оценки моделей ГПЗ в Арктике

Все указанные выше модели за исключением моделей Sandwell and Smith доступны на весь Земной шар, до полюса включительно. Модели семейства Sandwell and Smith ограничены по широте и не доступны северней 80.7° с.ш. (версия 29.1) и 80° с.ш. (версия 32.1). На рисунке 2 показано географическое расположение участков сравнения и протяженных профилей.

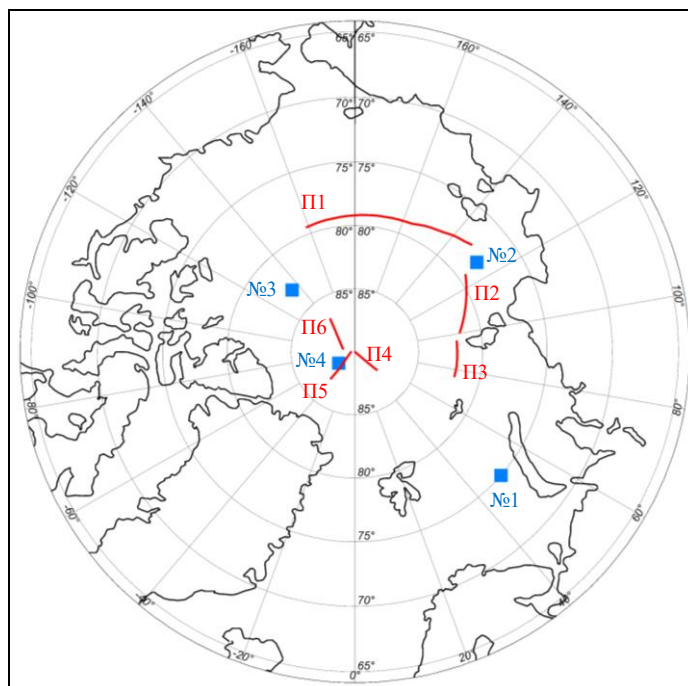


Рис 2. Расположение локальных участков сравнения (показаны синими квадратами) и протяженных профилей (показаны красными линиями) в Арктике.

В Таблице 1 показаны результаты оценок моделей ГПЗ на локальных участках сравнения, представляющие собой группы из нескольких пересекающихся профилей.

Таблица 1. СКО моделей ГПЗ относительно систем профилей морских съемок на локальных участках в разных широтах Арктики и над разными структурами дна океана, мГал. Выделены модели с наименьшей погрешностью на каждом участке.

Модель	Номер участка сравнения, его широта и максимальный градиент поля			
	№1 75° с.ш. 2 мГал/км	№2 78° с.ш. 5 мГал/км	№3 83° с.ш. 4 мГал/км	№4 88.5° с.ш. 7 мГал/км
EGM2008	0.752	3.067	4.099	7.412
WGM2012	0.659	2.716	3.236	7.429
XGM2019	0.901	2.520	4.089	6.737
SSv29.1	0.738	1.921	---	---
SGG-UGM-2	0.730	1.855	4.460	7.454
SSv32.2	0.677	1.755	---	---
DTU21	0.644	1.796	2.588	7.051

Необходимо отметить, что зависимость погрешности моделей от широты в Арктике хорошо прослеживается по данным в Таблице 1. Но при этом остается зависимость погрешности модельных данных от величины полного градиента аномального поля, которая в высоких широтах является не таким значимым фактором, влияющим на точность моделей ГПЗ, чем широта, но ее тоже необходимо учитывать: более градиентные области содержат дополнительные погрешности в модельных АСТ.

Для получения более широкой картины характеристик моделей ГПЗ в Арктике также были выполнены сравнения на протяженных профилях. Полученные оценки показаны в Таблице 2.

Таблица 2. СКО моделей ГПЗ на протяженных субмеридиональных и субширотных профилях, мГал. Выделены модели с наименьшей погрешностью на каждом профиле.

Модель	Номер профиля, его широта, протяженность и максимальный градиент поля					
	Субширотные профили			Субмеридиональные профили		
	П1 77.5 – 78.9° с.ш. 1500 км 1 мГал/км	П2 79.4 – 81.6° с.ш. 500 км 4 мГал/км	П3 82° с.ш. 300 км 3 мГал/км	П4 87.8 – 90° с.ш. 250 км 3 мГал/км	П5 87.2 – 89.7° с.ш. 290 км 5 мГал/км	П6 86.8 – 89° с.ш. 280 км 6 мГал/км
EGM2008	2.435	3.942	7.891	4.550	5.222	2.902
WGM2012	1.852	3.069	4.861	4.422	5.457	3.130
XGM2019	1.902	3.409	6.321	6.413	4.211	4.884
SSv29.1	1.497	---	---	---	---	---
SGG-UGM-2	1.432	3.420	8.137	4.499	5.297	2.769
SSv32.2	1.358	---	---	---	---	---
DTU21	1.699	2.044	3.480	4.353	5.490	2.496

Заключение

Как видно из полученных оценок на большинстве протяженных профилей и локальных участках сравнения в Арктике наименьшую погрешность относительно морских съемок содержит новая модель **DTU21 (2021)**. На широтах южнее 80° с.ш., как и на большинстве открытых акваторий Мирового океана [Михайлов и др., 2022], высокую для глобальной модели точность демонстрирует последняя модель семейства **Sandwell and Smith v32.1 (2022)**. Кроме того модели DTU21 и SSv32.1 имеют наиболее высокое разрешение среди всех исследуемых в данной работе моделей ГПЗ – 1' (≈ 1.85 км).

Модель **XGM2019**, которая для анализа была взята в версии разложения 2190 гармоник поля или в пространственном разрешении 5' (≈ 9.26 км), несмотря на хороший результат на локальном участке сравнения №4 и протяженном профиле №5 (оба находятся в одном районе) сильно зависима от региональных особенностей поля. На других участках и профилях точность модели XGM2019 заметно ниже модели DTU21.

В результате исследования показано, что возможности использования глобальных моделей ГПЗ в Арктике еще ограничены. Чем ближе к полюсу, тем выше погрешность модельных данных. Однако важно отметить, что в высоких широтах точность новых моделей повышается, что особенно заметно в широтах до 88° (см. Таблицу 1). Это значит, что

практическая ценность модельных данных постепенно растет и в перспективе Арктика будет представлена в глобальных моделях более достоверно.

Финансирование

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-17-20035.

Список литературы:

1. Михайлов П.С., Конешов В.Н., Соловьев В.Н., Железняк Л.К. Новые результаты оценок современных глобальных ультравысокостепенных моделей гравитационного поля Земли в Мировом океане // Гироскопия и навигация. – 2022. – Том 30. – №4. – С. 36-53.
2. Соколов А.В., Краснов А.А., Конешов В.Н., Глазко В.В. Первая высокоточная морская гравиметрическая съемка в районе Северного полюса Земли // Физика Земли. – 2016. – №2. – С.109-113.
3. Andersen, O.B., Zhang, S., Sandwell, D.T., Dibarboure, G., Smith, W.H.F., Abulaitijiang, A.: The Unique Role of the Jason Geodetic Missions for High-Resolution Gravity Field and Mean Sea Surface Modelling // Rem. Sens. – 2021. – № 13. – 646.
4. Balmino, G., Vales, N., Bonvalot, S., Briais, A., Spherical harmonic modelling to ultra-high degree of Bouguer and isostatic anomalies // Journal of Geodesy. – 2012. – № 86. – pp. 499 – 520.
5. Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // J. Geophys. Res. – 2012. – Vol. 117. – iss. B4. – B04406.
6. Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E., Francis, R., New global marine gravity from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. – 2014. – Vol. 346. – №. 6205. – pp. 65–67.
7. Wei Liang, Jiancheng Li, Xinyu Xu, Shengjun Zhang, Yongqi Zhao, A High-Resolution Earth's Gravity Field Model SGG-UGM-2 from GOCE, GRACE, Satellite Altimetry, and EGM2008 // Research Geodesy and Survey Engineering. – 2020. – vol. 6. – issue 8. – pp. 860–878.
8. Zingerle, P., Pail, R., Gruber, T., Oikonomidou, X., The combined global gravity field model XGM2019e // Journal of Geodesy. – 2020. – vol. 94. – Article number: 66.

УДК 550.834

Рубрика 37.01.81

РЕЗУЛЬТАТЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПРЕДЕЛЬНОМ МЕЛКОВОДЬЕ В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ

RESULTS OF SEISMIC OBSERVATIONS USING FIBER-OPTIC SYSTEMS IN SHALLOW WATER IN THE KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA

Белов Михаил Владимирович¹, Потемка Андрей Константинович¹, Токарев Михаил Юрьевич¹

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Belov Mikhail Vladimirovich¹, Potemka Andrey Konstantinovich¹, Tokarev Mikhail Yurievich¹

¹ Lomonosov MSU, Moscow

Введение.

Волоконно-оптические измерительные системы (ВОИС) успешно используются зарубежными компаниями в различных сферах, таких как поиск и обслуживание месторождений, геодинамический мониторинг, мониторинг состояния геотехнических сооружений, охранные системы и др. На территории РФ известны прецеденты мониторинга температуры вдоль скважины, применение технологии распределённого акустического зондирования для задач ВСП и морского НСП, а также в приложении охранных направлений. Летом 2023 года на территории Беломорской биологической станции им. Н.А. Перцова в активной приливно-отливной (транзитной) зоне была выполнена полевая съёмка, нацеленная на регистрацию преломлённых и поверхностных волн с использованием технологии распределённого акустического зондирования. Проведённый эксперимент продолжает серию опытных работ лаборатории анализа сейсмических данных МГУ с применением ВОИС с целью расширения технологии на задачи инженерно-геофизических исследований верхней части разреза.

Методика исследований.

Исследования выполнялись с использованием технологии распределённого акустического зондирования (distributed acoustic sensing DAS). Волоконно-оптический кабель был разложен в форме треугольника, стороны которого располагались: на поверхности земли в недостижимой для воды области, в области затопления водой (до 2 метров), одна из сторон была частично закопана в грунт. Регистрация производилась на блок DAS БОСК-А производства ООО "Петрофайбер" с величиной gauge length 2 метра и шагом опроса 1 метр. Возмущения производились с помощью кувалды в точках вершин треугольника, а также вдоль линии закопанного волокна.

Результаты.

Наиболее ярким оказался результат метода поверхностных волн, изображённый на рисунке 1. На рисунке 1 (А) изображена сейсмограмма общего пункта возмущения (ОПВ), нормировка на максимум каждой трассы. На сейсмограмме отчётливо наблюдаются цуги сравнительно

низкочастотных (10-30 Гц) и низкоскоростных (150-300 м/с) волн, интерпретируемых, как поверхностные. По сейсмограмме (А) строится дисперсионное изображение (В), представляющее собой некоторую карту интенсивностей фазовой скорости в зависимости от частоты. По дисперсионному изображению построена дисперсионная кривая, от которой подбирается решение обратной задачи (С).

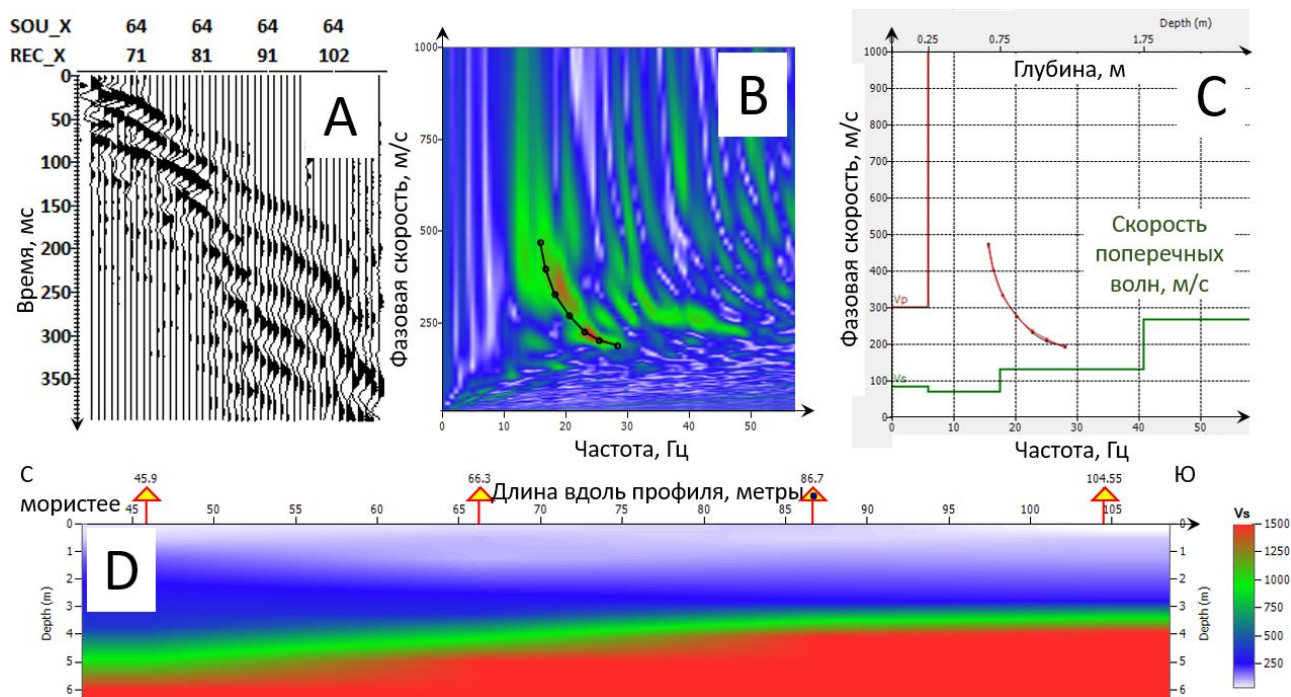


Рис.1. Результаты метода поверхностных волн. (А) - Сейсмограмма ОПВ. (В) - Дисперсионное изображение сейсмограммы (А). (С) - Окно решения обратной задачи, где красная кривая - теоретическая, чёрная - отснятая с изображения (В), зелёная ломанная - скорости поперечных волн, горизонтальные оси нижняя и верхняя - частота и глубина соответственно. (D) - разрез поперечных волн, окна (А, В, С) представлены для пикета с координатой 86.7.

На панели (С) подобранная теоретическая красная кривая почти идеально накладывается на отснятую с дисперсионного изображения чёрную, что ставит её в соответствие некоторую модель среды.

По априорным данным (визуальное наблюдение) нижнее полупространство представлено породами с высокими скоростями поперечных волн (кристаллический фундамент Беломорского бассейна), который перекрывается слоем песчано-глинистых осадков и рассыпчатого песка (по наблюдениям в закопашке). Результат сейморазведки методом поверхностных волн - глубинный разрез скоростей поперечных волн, представляет собой трехслойную модель. Верхний слой (0.5-1.0 м) представлен скоростями поперечных волн, не превышающих 100 м/с, что свидетельствует о крайне слабой связности частиц грунта. Скорости поперечных волн среднего слоя достигают 300 м/с, что может свидетельствовать об уплотнении осадка. Нижнее полупространство представлено скоростями поперечных волн до 1500 м/с, что подобрано исходя из сеймогеологических параметров магматических пород. Кровля полупространства закономерно углубляется со стороны моря, в то время как на берегу фиксируются обнажения кристаллического фундамента.

Выводы.

Целью работы являлись испытания технологии распределённого акустического зондирования для решения задач инженерно-геофизических исследований верхней части разреза с применением методик сейморазведки преломлённых и поверхностных волн. Полученный на

первых этапах результат удовлетворяет геологическим представлениям о районе работ. В дальнейшем планируется сопоставление модели с результатами других методов геофизики в изучаемой области, а также, возможно, бурением.

Список литературы:

1. Методические рекомендации по определению состава, состояния и свойств грунтов сейсмоакустическими методами, Москва, Министерство транспортного строительства, 1985
2. Рекомендации по определению скоростей распространения поперечных волн по данным регистрации поверхностных волн типа Релея и Лява. ИМД 75-80. М., Стройизыскания, 1980.
3. Антипов В.В., Офрихтер В.Г. Современные неразрушающие методы изучения инженерно-геологического разреза // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37–49. DOI: 10.15593/2224-9826/2016.2.04
4. Дмитриевский А.Н., Еремин Н.А. Текущее состояние цифровой модернизации нефтегазодобычи», Cloud & Digital Transformation 2018
5. Лапшина Ю.В., Рыбка В.Ф. Результат применения оптоволоконных технологий распределенной термометрии при освоении скважины с помощью ЭЦН // Экспозиция Нефть Газ. 2013. №7 (32).
6. Hartog, A.H. (2017). An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>

УДК 574.65

Рубрика 34.53.21

ПРИМЕНЕНИЕ ПАССИВНОЙ ГИДРОЛОКАЦИИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ БЕНТОСНЫХ ОРГАНИЗМОВ, ИЗЛУЧАЮЩИХ В ПРОЦЕССЕ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ АКУСТИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ

THE USE OF PASSIVE SONAR FOR THE STUDY OF BENTHIC ORGANISMS THAT EMIT ACOUSTIC SIGNALS IN THE PROCESS OF VITAL ACTIVITY

Бибиков Николай Григорьевич^{1,2}, Попов Олег Евгеньевич³, Корецкий Михаил Иванович, Кенигсбергер Генрих Викторович⁴, Михеев Василий Иванович⁴

¹ *Институт Проблем Передачи Информации имени А.А. Харкевича РАН, Москва*

² *АО «Акустический институт имени акад. Н. Н. Андреева», Москва*

³ *Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва*

⁴ *Институт экологии АН Абхазии, Сухум*

Bibikov Nikolai Grigorievich^{1,2}, Popov Oleg Evgenievich³, Koretsky Mikhail Ivanovich, Konigsberger Heinrich Viktorovich⁴, Mikheev Vasily Ivanovich⁴

¹ *Kharkevich Institute for Information Transmission Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow*

² *Andreyev Acoustics Institute, Moscow*

³ *Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

⁴ *Institute of Ecology, Abkhazian Academy of Sciences, Sukhum*

Введение

В работе рассмотрены особенности применения акустического метода определения местоположения, или гидролокации, бентосных и пелагических организмов, излучающих акустические сигналы. Это могут быть как звуковые, так и ультразвуковые сигналы, возникающие в процессе жизнедеятельности. Особенности применения метода пассивной гидролокации, будут рассмотрены на примере гидролокации альфеусов в эксперименте, проведенном в прибрежной зоне Черного моря у мыса Сухумский. Альфеусы – род креветок семейства Alpheidae, это бентосные организмы, проводящие основное время в довольно глубоких и разветвлённых норах вырытых в дне. Глубина обитания до 20 м.

Сигналы альфеусов

Альфеусы излучают мощные и короткие широкополосные импульсные сигналы[1]. Импульсы излучаются для оглушения добычи, внутривидовой коммуникации, а также для защиты убежища или территории. На рис. 1 представлен один из таких импульсов в полосе частот приемного тракта 0.3-45 кГц. Излучение сигнала альфеусом происходит

следующим образом. Когда захлопывается клешня альфеуса, происходит выброс струи воды со скоростью, составляющей примерно 20-30 м/с. При этом, в соответствии с законом Бернулли, давление в струе сильно падает по сравнению с давлением в окружающей среде. Это соответствует началу сигнала, которое на рис.1 обозначено цифрой 1. В результате падения давления образуется, растет и перемещается в струе воды кавитационный пузырек и давление повышается, цифра 2 на рис.1.

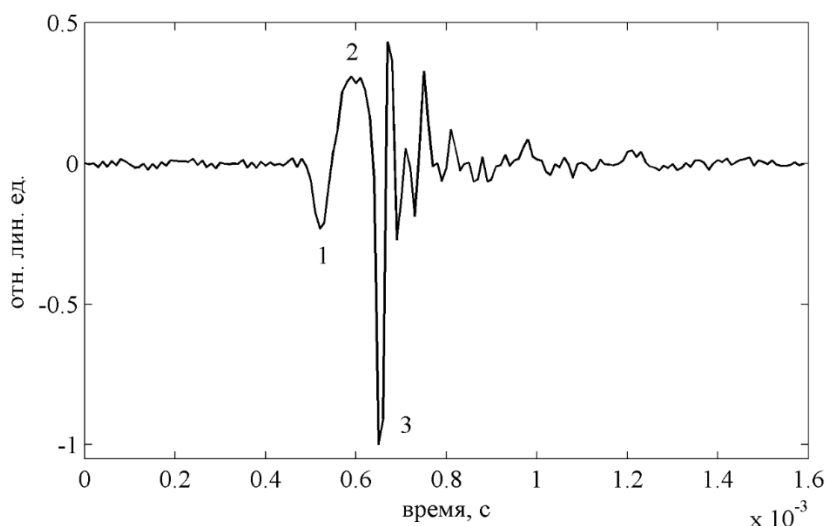


Рис1. Сигнал, излучаемый альфеусом. Цифрами обозначены фазы сигнала.

Затем, когда скорость струи уменьшается, кавитационный пузырек схлопывается, в результате чего излучается мощный короткий импульс отрицательного давления, цифра 3 на рис.1. В конце импульса видны осцилляции давления, по-видимому, связанные с осцилляцией кавитационного пузыря и/или с отражением от близкорасположенных поверхностей.

Мощный короткий импульс отрицательного давления обеспечивает большую ширину частотного спектра сигнала. В момент схлопывания кавитационного пузырька излучаются частоты, лежащие в диапазоне звуковых и ультразвуковых волн, согласно [2] примерно от десятков Гц и до 200 кГц. Поэтому относительная амплитуда отрицательного давления при схлопывании кавитационного пузырька намного выше, чем на рис.1, где сигнал изображен в полосе до 45 кГц. Уровень излучения в максимуме достигает от 190 до 210 дБ относительно 10^{-6} Па на 1 м [1]. В зависимости от помеховой обстановки и частотного диапазона приемного устройства сигналы альфеусов заметно превышают окружающий шум на расстояниях, составляющих сотни метров. Благодаря большой ширине спектра и мощности сигналы альфеусов представляют собой идеальный объект для гидролокации.

Пеленгация сигналов

Для определения местоположения альфеусов в рассматриваемом эксперименте, в котором решались и другие научные задачи, использовались пеленгаторы, антенны которых состояли из четырех приемников (гидрофонов), размещенных в углах правильного тетраэдра с гранями 1 м. Такой пеленгатор позволяет определить углы прихода акустических сигналов в горизонтальной (азимут) и вертикальной (угол скольжения) плоскостях.

Принцип работы пеленгаторов основан на измерении разностей времен приходов (задержек) сигналов на приемники. Задержки обычно вычисляются с помощью функции взаимной корреляции. По измеренным задержкам, считая, что фронт акустической волны плоский, и используя простейшие геометрические вычисления, рассчитывают углы прихода сигнала в горизонтальной плоскости (азимут) и кажущуюся (или горизонтальную фазовую) скорость. Зная скорость звука на горизонте приемников, по кажущейся скорости можно вычислить угол скольжения a :

$$a = \arccos(C_w/C_k)$$

где C_w – скорость звука в воде на горизонте приема, C_k – кажущаяся скорость

Расчеты проводятся при важном допущении, что фронт акустической волны – плоский, что выполняется с хорошей точностью, когда расстояния между приемниками пеленгатора много меньше расстояния до точечного источника сигнала. Расстояния между приемниками выбирается примерно равным длине волны нижней частоты рабочего диапазона частот. Поскольку полоса частот сигналов альфеусов велика, то выбор полосы частот работы приемного тракта пеленгаторов можно делать, исходя из требуемой ширины взаимно корреляционной функции, определяющей точность измерения задержек. Задержки сигналов вычисляются по измеренным временам максимумов взаимно корреляционных функции для пар приемников, а ширина этого максимума равна примерно удвоенной величине обратной ширине частотного диапазона сигнала. При обработке в рассматриваемом эксперименте частотный диапазон приемного тракта был от 3 до 45 кГц, и ширина максимума взаимно корреляционной функции составляла примерно $2/(45000-3000) = 47.6$ мкс. При выборе нижней частоты приемного тракта, следует учитывать, что ниже 3 кГц отношение сигнал/шум часто бывает низким, ввиду большой низкочастотной динамической помехи и помехи от наката волн на берег, обычно находящийся сравнительно близко от пеленгаторов.

Океанографическая платформа, с которой проводились работы, стоящая на сваях, имела в плане вид квадрата со стороной равной примерно 14.7 м. Глубина под платформой уменьшалась от 12.6 м со стороны открытого моря до 4.3 м у края более близкого к берегу. Есть основания полагать, что платформа, создавала благоприятные условия для обитания под ней раков-щелкунов [3,4]. Пеленгаторы крепились на краю платформы по ее углам на металлических штангах на глубине 6 м (при глубине места примерно 12.6 м), примерно в 40 м от берега.

При использовании двух разнесенных в пространстве на 14 м пеленгаторов можно было определить местоположение источника сигналов, как точки пересечения лучевых траекторий, исходящих от пеленгатора с измеренными азимутами и углами скольжения с учетом профиля скорости звука. Недостатком крепления пеленгаторов, на длинных трубах, являются колебания пеленгаторов, вызванные прохождением зыби и прибрежным течением. В эксперименте при зыби высотой до 0.5 м периодические отклонения пеленгаторов от вертикали достигали углов 2° – 4° . Это, несомненно, дает заметную ошибку в определении координат источников сигналов. При отклонении трубы от вертикали на 1 град и расстоянии до источника сигнала 10 м, ошибка может быть до 0.17 м. Для уменьшения этой ошибки можно контролировать положение пеленгаторов в пространстве с помощью двухкоординатных инклинометров и цифрового компаса (для учета вращения пеленгатора), показания которых учитываются при расчете координат. Для уменьшения влияния волнения на пеленгаторы следует уменьшать парусность конструкции пеленгаторов.

Дополнительные погрешности при локации могут возникать из-за рефракции звука при наличии выраженного термоклина на глубинах проведения измерений, что на Черном море бывает, например, весной, пока не появится приповерхностный перемешанный прогретый слой толщиной 10-15 м. При наличии такого слоя с практически постоянной скоростью звука, лучевые траектории можно считать прямолинейными. При необходимости учета

рефракции звука нужно измерять профиль скорости звука и рассчитывать реальные лучевые траектории, идущие от пеленгатора под измеренными углами скольжения. По результатам нашей экспериментальной локации [3,4] оказалось, что глубины обитания альфеусов не превышают 15 м, поэтому большую часть лета и осени, можно считать, что эффекты рефракции малы.

Для проверки реальной точности определения координат можно использовать сигналы, небольшого излучателя (например, гидрофон), который помещается на дно в точки с известными координатами, и излучает короткие импульсы, имитирующие сигналы альфеусов. Сравнивая координаты, полученные при локации этих сигналов, с истинными координатами излучателя, можно оценить точность локации и ее зависимость от расстояния от пеленгаторов.

С учетом приобретенного опыта, для локации альфеусов при повышенных требованиях к точности пеленгации, можно предложить следующую, более надежную измерительную схему. В качестве неподвижной основы для размещения пеленгаторов можно использовать горизонтально расположенную жесткую раму в виде равностороннего треугольника со стороной примерно 3м, приподнятую на ножках над дном на высоту примерно 1-1.5 м. В каждом углу треугольной рамы размещается пеленгатор, состоящий из трех приемников, лежащих в горизонтальной плоскости в углах равностороннего треугольника со стороной около 0.1-0.3 м. При таких размерах рамы можно обеспечить ее жесткость, если ее изготовить, например, из алюминиевого профиля, а также обеспечить неподвижность пеленгаторов относительно дна, что значительно повышает точность локации. Рама устанавливается на дно. Положение альфеусов определяется в системе координат, привязанной к неподвижной раме. В такой схеме локация альфеусов проводится не только внутри рамы, но и вне ее, на расстояниях от центра каждой стороны примерно на удвоенную длину стороны треугольника. При стороне треугольной рамы 3 м общая площадь точной локации альфеусов будет составлять примерно 140 м².

Рабочий диапазон частот приемного тракта можно сдвинуть в сторону высоких частот, например, сделав его 6-50 кГц. Тогда расстояния между приемниками можно уменьшить до 0.25 м. При необходимости уменьшения размеров пеленгаторов диапазон частот может быть еще больше сдвинут в сторону высоких частот. Это может быть выгодно и по причине уменьшения помехи с ростом частоты.

В рассмотренной схеме используется три пеленгатора по три приемника, расположенных в одной горизонтальной плоскости. Предложенный метод позволяет надежно лоцировать альфеусов по излученным ими прямым сигналам, т.е. тем, которые не отражаются от дна и поверхности.

Для приближенного определения расстояния до источника интенсивного короткого импульса, можно предложить упрощенную схему локации с одним пеленгатором, которая наряду с прямыми сигналами использует сигналы, отразившиеся от поверхности воды. Эти сигналы приходят после прямого импульса с небольшой задержкой. Поскольку при отражении от поверхности воды фаза сигнала меняется на 180°, то сигнал, отразившийся от поверхности воды, отличается от основного знаком и амплитудой. Взаимная корреляция между этими сигналами будет высокой. Задержка по времени между прямым сигналом и сигналом, отразившимся от поверхности воды, позволяет оценить расстояния до источника. В случае незначительного волнения, после отражения от поверхности воды азимут прихода обоих сигналов будет близким. Измеренные углы скольжения сигналов, позволяют вычислить глубину источника сигнала, что, при измеренном азимуте, позволяет вычислить координаты источника сигналов.

При анализе последовательности сигналов дополнительным критерием для определения принадлежности сигнала к определенной особи, может являться величина взаимной

корреляции сигналов, которая высока для сигналов одной особи. По-видимому, это связано с индивидуальными особенностями особи (строение клешни, возраст и т.д.), а также сравнительно небольшим ареалом ее обитания, определяющим небольшие вариации расстояния до пеленгатора и постоянство глубины, что влияет на условия образования кавитационного пузыря.

Выводы

Рассмотренные варианты акустической локации могут с различной точностью обеспечить слежение за мобильностью отдельных особей альфеусов, их сигнальной активностью и ее зависимости от времени суток и метеоусловий. Метод акустической локации может применяться и для локации других животных, издающих звуки в процессе жизнедеятельности, причем не только в воде, но и, с не меньшим успехом, на воздухе.

Для контроля и вычисления поправок с целью повышения точности локации могут быть использованы размещенные на дне звуковые источники сигналов с точно известными координатами. Некоторую неоднозначность при локации могут создавать наложения сигналов при большой численности альфеусов на исследуемой акватории. Однако, в виду очень коротких сигналов ($< 0.4 \cdot 10^{-3}$ с) такое наложение не должно быть частым и заметно мешать гидролокации. Заметим, что точное знание местоположения источника мощного излученного импульса может быть полезно для звукового освещения прибрежной гидроакустической обстановки в режиме пассивной локации.

Благодарность

Авторы благодарят А.Н. Серебряного и Р.С. Дбара за содействие в организации экспериментов.

Список литературы:

1. Versluis M., Schmitz B., von der Heydt A., Lohse D. How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles// Science — 2000. — No 289.— С. 2114.
2. Bibikov N.G., Ovchinnikov O.B., Ivanov M.P., Serebryany A.N. Snapping shrimps sounds in the Black Sea // Proceedings of 23 International Kongress on Acoustics — P. 4459-4464. Electronic resource. <http://pub.dega-akustik.de/ICA2019/data/articles/001376.pdf>
3. Бибииков Н.Г., Попов О.Е. Акустическая локация альфеусов на шельфе Черного моря и индивидуальные особенности их щелчков// Труды Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» — 2020 —СПб. Политех-пресс. — С. 300 – 303.
4. Bibikov N.G., Makushevich I.V. Structure of the snapping shrimps' acoustical activity in the Black Sea shallow water// J. Acoust. Soc. Am.—2020—Vol. 148.—No 4. — P. EL389-EL393. <https://doi.org/10.1121/10.0002260>

УДК 550.834.05

Рубрика 37.31.15

АТРИБУТИВНЫЙ АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ МОВ ОГТ 2D ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГИДРАТО- И ГАЗООБУСЛОВЛЕННЫХ АНОМАЛИЙ НА ШЕЛЬФЕ И КОНТИНЕНТАЛЬНОМ СКЛОНЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

ATTRIBUTE ANALYSIS OF CDP 2D DATA TO IDENTIFY ANOMALIES ASSOCIATED WITH HYDRATES AND GAS ON THE SHELF AND CONTINENTAL SLOPE OF THE LAPTEV SEA

Чазов Артём Олегович^{1,2}, Матвеева Татьяна Валерьевна¹

¹ ФГБУ "ВНИИОкеангеология", Санкт-Петербург

² ФГБУ "СПбГУ", Санкт-Петербург

Chazov Artyom Olegovich^{1,2}, Matveeva Tatiana Valerievna¹

¹ FSBI "VNIIOkeangeologia", Saint Petersburg

² FSBI "SPbU", Saint Petersburg

Введение

Исследуемая акватория, охватывающая континентальный склон и шельф моря Лаптевых, включает южные части хребта Гаккеля и обрамляющих его глубоководных котловин Нансена и Амундсена. Согласно [Petrov et al., 2021], район находится в границах продельты реки Лена, на пассивных окраинах хребта Ломоносова, и Баренцево-Карской. Акватория моря Лаптевых из-за высокой мощности осадочного чехла и подходящих термобарических условий перспективна на углеводороды, в том числе, и на газовые гидраты. В пределах исследуемого района было известно только два участка с выявленным гидратообусловленным горизонтом BSR [Богоявленский и др., 2018, Васильева и др., 2019]. Однако расчетные зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ) как фильтрационного, так и криогенного генезиса занимают почти всю акваторию моря [Матвеева и др., 2022]. Целью нашего исследования было выделение новых, актуализация ранее известных аномалий BSR и выделение газобусловленных аномалий по данным сейсморазведки МОВ ОГТ. Основной проблемой при выявлении по геофизическим данным газо- и гидратообусловленных аномалий является низкое качество сейсморазведочных материалов в верхней части разреза, поскольку при съемке, обработке и подготовке материалов глубинной сейсморазведки обычно ориентируются на целевые горизонты, находящиеся на значительных поддонных глубинах. Для решения этой проблемы, была поставлена задача оценить применимость различных сейсмических атрибутов при оценке газо- и гидратоносности разреза.

Материалы и методы

Работа основана на авторской интерпретации материалов сейсморазведки в море Лаптевых и Евразийском бассейне, выполнялась в секторе нетрадиционных ресурсов углеводородов ФГБУ "ВНИИОкеангеология" в рамках тематических работ по количественной оценке, ресурсов газовых гидратов в морях России. В 2022-2023 гг. был собран, систематизирован и проанализирован значительный объем геофизической информации: АО "РОСГЕОЛОГИЯ",

ОАО "МАГЭ", ОАО "СЕВМОРГЕО" 2011-2020 гг. Всего было изучено 174 суммированных профиля МОВ ОГТ 2D общей протяжённостью более 66 тыс. пог. км (Рис. 1).

При рассредоточенной фильтрации углеводородов формируются крупные скопления гидратов на значительных поддонных глубинах (сотни метров). Среди сейсморазведочных признаков газовых гидратов наиболее широко используемым и достоверным является BSR (англ. bottom simulating reflector). Это фазовая граница, которая появляется из-за разницы в акустических свойствах между отложениями, содержащими гидраты, и газонасыщенными отложениями, которые находятся под ними.

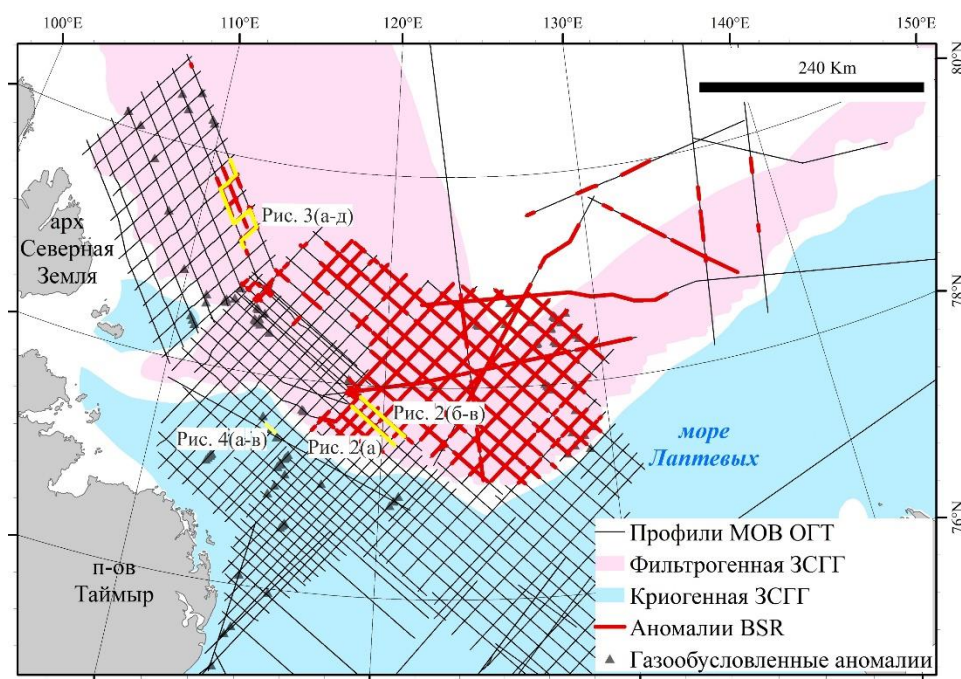


Рис. 1. Схема расположения изученных профилей, выявленных BSR и очагов разгрузки углеводородов. ЗСГГ по [Матвеева и др., 2022].

Основными признаками BSR являются: 1) субпараллельность рельефу морского дна, 2) пересечение им осадочной слоистости, 3) обратная полярность отраженного сигнала [Матвеева, 2018]. Иногда над/под BSR формируется акустически прозрачная зона – так называемая зона осветления. При работе с сейсморазведочными материалами МОВ ОГТ кондиционного качества, сочетание этих признаков достаточно для идентификации BSR. В условиях интерпретации материалов низкого качества выявление основных признаков BSR осложнено. В частности, BSR не проявляется на разрезах из-за низкого соотношения сигнал/шум; на сейсмических разрезах наблюдается значительное количество артефактов обработки, перекрывающих полезный сигнал; из-за интерференции сигнал от BSR не различим. Возможным решением этих проблем является применение сейсмических атрибутов, основанных на преобразовании Гилберта: мгновенные амплитуда, частота и фаза.

Разрез мгновенных амплитуд отражает акустическую контрастность отложений. Поскольку между гидратонасыщенными и газонасыщенными отложениями имеется значительный контраст акустических свойств мгновенная амплитуда может быть использована для идентификации BSR и свободного газа. Использование разрезов мгновенных частот позволяет разделить отложения, содержащие свободный газ и гидраты. Газонасыщенные отложения сильно поглощают энергию сигнала, им соответствуют зоны уменьшения мгновенной частоты, тогда как сейсмические волны, проходящие через гидратонасыщенные

отложения, ассоциируются с большими значениями частоты. Поскольку из-за интерференции волн BSR не всегда различим, применение мгновенной фазы допустимо для уменьшения помех и усиления BSR, так как все сейсмические события, включая слабые, отображаются с одинаковой амплитудой [Матвеева и др, 2018]. В этом случае мгновенная фаза может использоваться, для обнаружения пересечения с осадочной слоистостью.

Скопления гидратов, образующиеся в условиях концентрированных потоков углеводородов, формируются вблизи дна или на дне в очагах разгрузки газа. Указанные структуры, выявляются по аномалиям, связанным с восходящей миграцией углеводородных газов, типа "газовая труба" ("газовые трубы" - узкие вертикальные зоны с хаотическими отражениями), а также по амплитудно-скоростным аномалиям, зонам осветления и хаотическим отражениям, свидетельствующим о значительной газонасыщенности отложений [Judd and Hovland, 2007].

Наиболее затруднена задача интерпретации "газовых труб" и других признаков газонасыщенности в условиях мелководного шельфа, где распространена криогенная зона стабильности, обусловленная субмаринными многолетнемерзлыми породами. В верхних 500 м таких сейсмических разрезов практически отсутствует полезная информация, что связано с артефактами обработки при подавлении реверберации. В таком случае для выделения "газовых труб" возможно применение атрибутов, показывающих степень корреляции соседних трасс между собой (например, атрибут "когерентность"), поскольку основной признак газовых труб - вертикальные зоны с хаотическими отражениями, т.е. зоны низких значений когерентности.

Результаты

Из всего изученного массива информации, только материалы АО "РОСГЕО" обладают достаточным для однозначной идентификации BSR качеством в верхних 1000 м осадочного чехла. Наглядное сравнение качества записи приведено для двух близко расположенных и одинаково ориентированных разрезов (Рис. 2). На разрезе (см. рис. 2(а)) видны все приведенные выше признаки BSR; тогда как на рисунке 2(б) разрез осложнен множеством помех (высокий уровень шума, артефакты обработки с отличающейся амплитудно-частотной характеристикой от полезного сигнала), из-за этого невозможно однозначно определить пересечение горизонта с осадочной слоистостью и выявить осветление. Однако используя разрез мгновенной фазы однозначно решает эти проблемы.

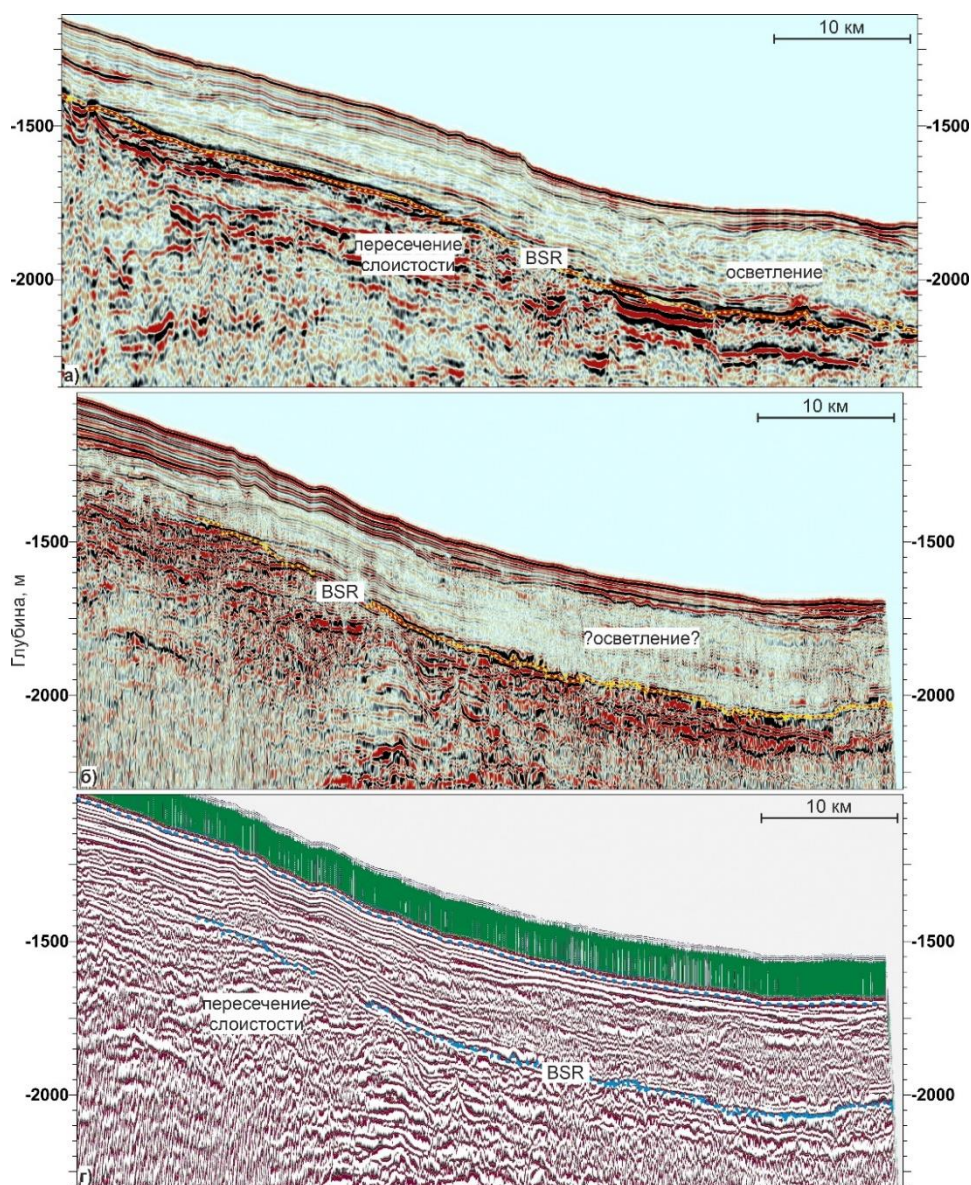


Рис. 2. Сейсмический разрез по фрагменту профиля SL182D31 АО "РОСГЕО" (а), сейсмический разрез по фрагменту профиля РТ1125 (ОАО "МАГЭ"), разрез мгновенной фазы по фрагменту профиля РТ1125 (ОАО "МАГЭ"), положение профилей см. на рисунке 1.

Довольно сложной задачей является и выявление BSR при субпараллельности осадочной слоистости и морского дна. На сейсмическом разрезе (Рис. 3(а)) BSR по прямым признакам выделяется только на маленьком участке, для прослеживания горизонта на соседние области были использованы разрезы мгновенных амплитуды и частоты (Рис. 3(б-в)). На разрезе мгновенных амплитуд чётко выделяются области усиленных отражений ниже горизонта BSR и зоны осветления над ним, что значительно облегчает корреляцию горизонта. На разрезе мгновенных частот явно выделяются две области: высоких частот над BSR и низких под BSR; что является дополнительным подтверждением интерпретации. На правильность интерпретации указывает и разрез с введённой статической поправкой за глубину моря (Рис. 3(г)). На разрезе видно, что глубина BSR практически постоянна и близка к расчётному значению подошвы ЗСГГ по [Матвеева и др., 2022].

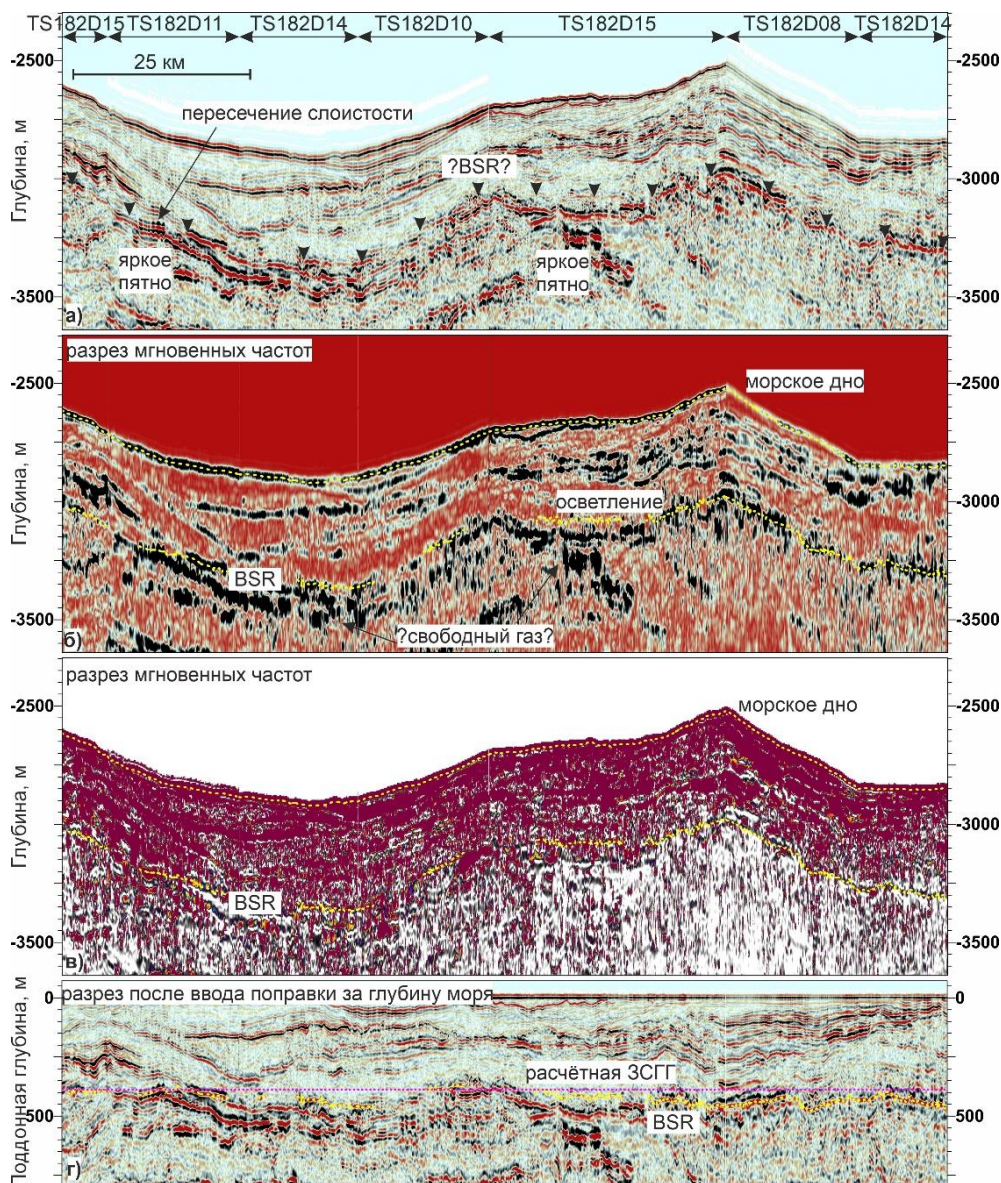


Рис. 3. Композитный сейсмический разрез по фрагментам профилей TS182D08, TS182D10, TS182D14, TS182D15 (АО "РОСГЕО): (а), разрез мгновенных амплитуд (б); разрез мгновенных частот (в); сейсмический разрез с введённой поправкой за глубину моря (г); положение профилей см. на рисунке 1.

На исследуемой акватории было выявлено 127 очагов разгрузки газа в пределах ЗСГГ. На рисунке 4(а) приведён пример сейсмического разреза в пределах криогенной ЗСГГ, на котором сложно выделить газообусловленные аномалии, из-за низкого качества верхних 500 м. На рисунке 4(б) приведён пример разреза атрибута "когерентность". На нём явно выделяются разрывные нарушения (узкие субвертикальные зоны низкой когерентности - чёрные полосы на разрезе) и субвертикальные зоны низкой корреляции шириной 350-1000 м, маркирующие положение "газовых труб". Подтверждением могут служить небольшие, на грани разрешающей способности метода, депрессии на морском дне над "газовыми трубами" (вероятно, покмарки).

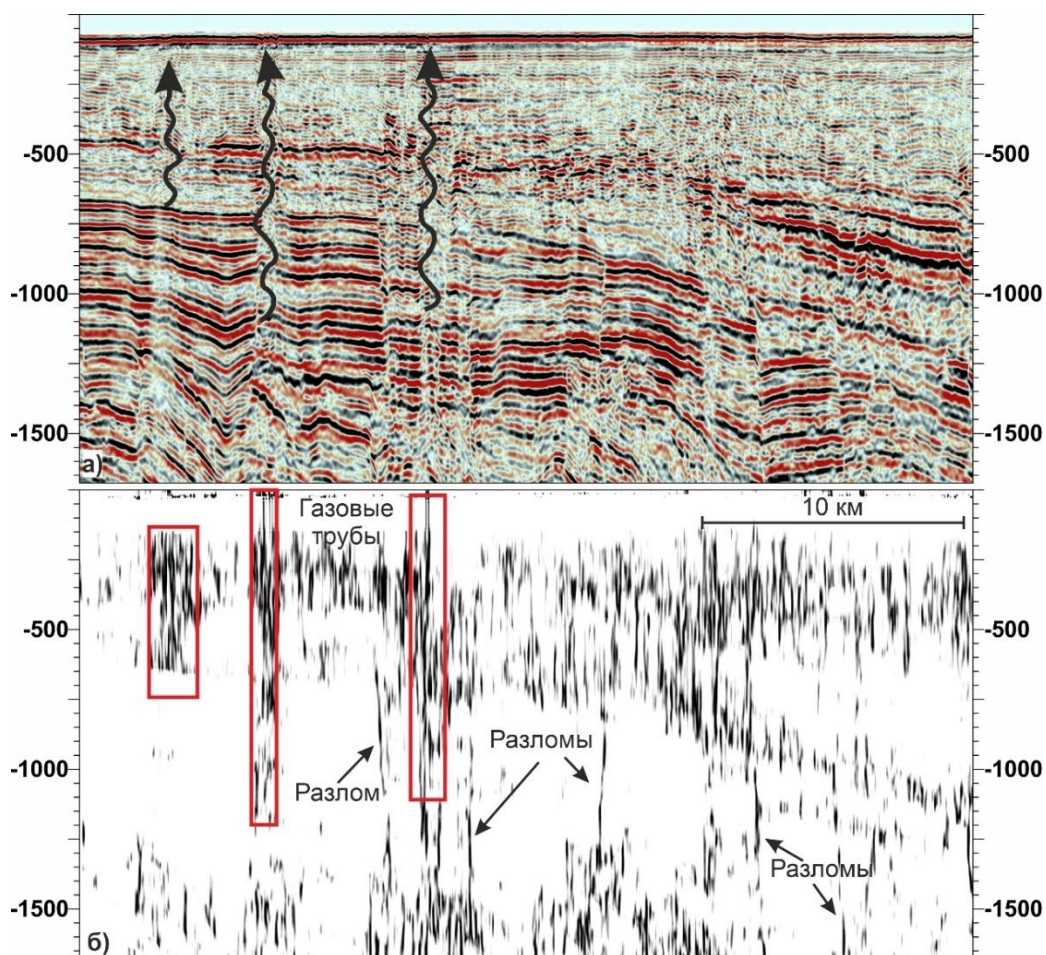


Рис. 4. Сейсмический разрез по фрагменту профиля NWL1417 (а); разрез атрибута "когерентность" (б); положение профилей см. на рисунке 1.

Выводы

В результате выполненного исследования удалось подтвердить эффективность применения сейсмических атрибутов на основе преобразования Гилберта при интерпретации горизонта BSR на сейсмических разрезах МОВ ОГТ; и эффективность применения атрибутов, оценивающих когерентность для выявления зон вертикальной разгрузки газа. В акватории моря Лаптевых выявлено 288 фрагментов сейсмических профилей с BSR, что позволяет предполагать наличие здесь крупного скопления газовых гидратов, площадь которого, вероятно, составляет около 60 тыс. кв. км. Также было идентифицировано 127 очагов разгрузки газа в пределах ЗСГГ. Для более точной и достоверной оценки гидратоносности моря Лаптевых необходима переобработка первичных материалов сейсморазведки, скоростной анализ, нацеленный на верхнюю часть разреза, а также расчёт и анализ AVO атрибутов.

Список литературы:

1. Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Cambridge Univ. Press, New York, 2007. 475 p.
2. Petrov, O.V. et al. (2021). New Tectonic Map of the Arctic. In: Petrov, O.V., Smelror, M. (eds) Tectonics of the Arctic. Springer Geology. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0_1

3. Богоявленский В. И. и др. Газовые гидраты на акваториях циркумарктического региона // Научные исследования в Арктике. 2018. Т. 3. № 3(31). С. 42–55.
4. Матвеева Т. В. Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках. Москва. Научный мир, 2018.
5. Матвеева Т.В. и др. Методические рекомендации по проведению геологоразведочных работ на газовые гидраты в акваториях морей России. Санкт-Петербург: ФГБУ «ВНИИОкеангеология», 2018. 172 р.
6. Матвеева Т.В. и др. Отчет о результатах работ, выполненных за 2022 год в рамках Государственного задания Федерального агентства по недропользованию Федерального агентства по недропользованию №049-00017-22-01 от 14 января 2022 г. на 2022 год и плановый период 2023 и 2024 годов по разделу: 1.3.3. Тематические и опытно-методические работы по обоснованию минерально-сырьевой базы нетрадиционных источников углеводородного сырья на акваториях Российской Федерации, Санкт-Петербург, 2022.

УДК 550.8.05, 004.89

Рубрика 38.57.23

**ПРИМЕНЕНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ
ЛИНЕЙНЫХ АНОМАЛИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ БАРЕНЦЕВО-КАРСКОГО
РЕГИОНА**

**APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS TO IDENTIFY LINEAR
MAGNETIC FIELD ANOMALIES IN THE BARENTS-KARA REGION**

**Шклярук Алексей Дмитриевич¹, Кузнецов Кирилл Михайлович¹, Лыгин Иван
Владимирович¹, Арутюнян Давид Артурович¹**

¹ *Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва*

**Shklyaruk Alexey Dmitrievich¹, Kuznetsov Kirill Mikhailovich¹, Lygin Ivan
Vladimirovich¹, Arutyunyan David Arturovich¹**

¹ *Department of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Введение

На первых этапах интерпретации аномального магнитного поля часто ставится задача выделения их локальных особенностей, в том числе линейных аномалий, которые могут быть приурочены к различным протяженным магматическим комплексам. В настоящее время ее решение во многих случаях сводится к поиску трансформант с подходящими ядрами преобразования, например, высокочастотная фильтрация, вычисление полного горизонтального градиента и т.п. В данной работе рассмотрен метод по выделению линейных структур потенциальных полей, основанный на сверточных нейронных сетях.

Для решения поставленной задачи с помощью сверточной нейронной сети (СНС) необходимо создать обучающую выборку. Она составлена из синтетических моделей, каждая из которых (Рис. 1В) строилась в два этапа: расчёт магнитного эффекта от линейно вытянутой призмы (Рис. 1А), параметры которой заданы случайно и добавление к эффекту случайного шума (Рис. 1Б). Для выходных данных создавалась матрица, характеризующая положение линеамента (Рис. 1Г). Всего для обучения СНС создано более 25 наборов синтетических данных, состоящих из множества карт (от 100 до 1000).

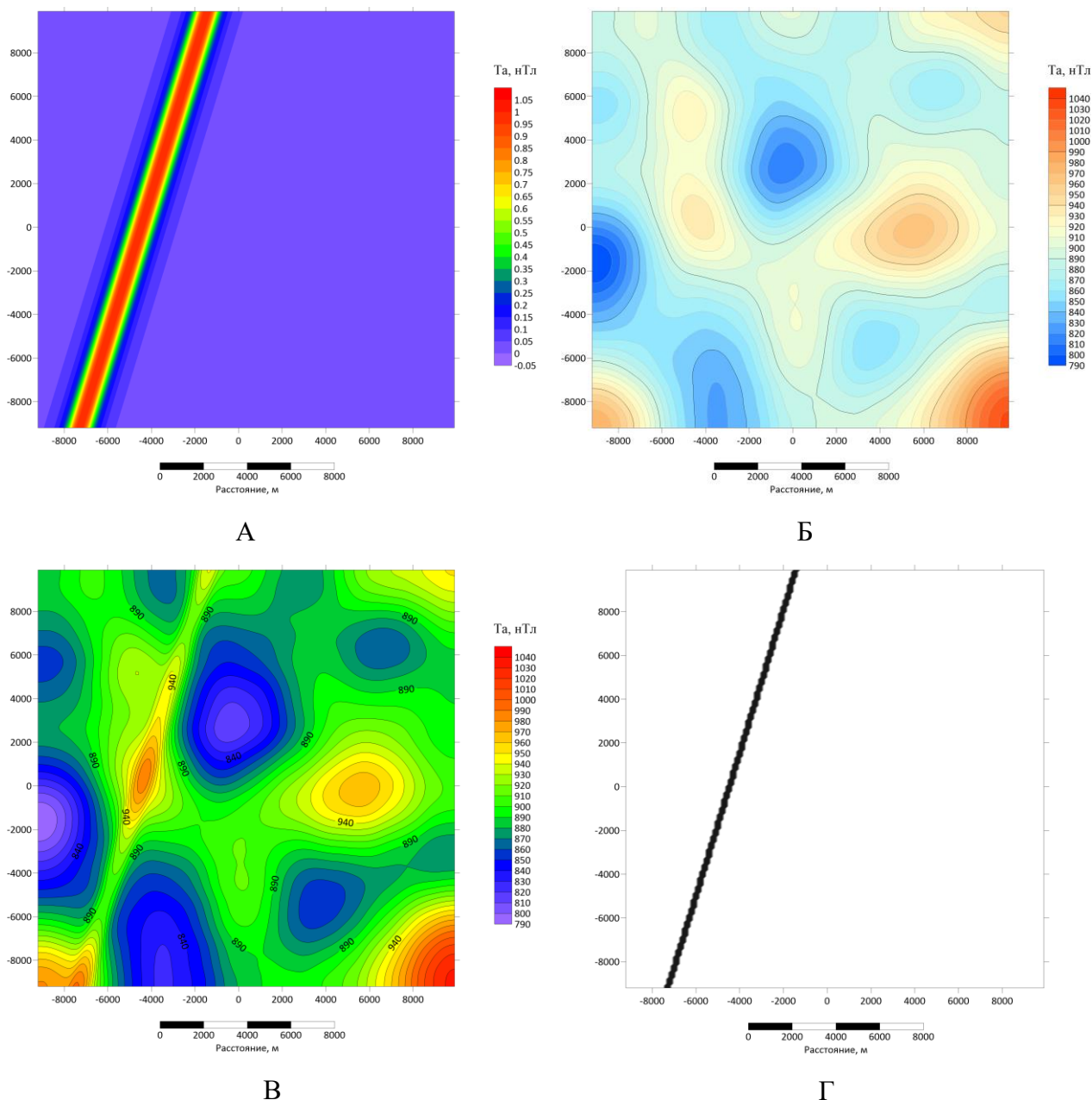


Рис. 1 Обучающая выборка. А – магнитный эффект линейно вытянутой призмы; Б – случайный шум; В – итоговая модель для обучения СНС; Г – положение линейамента, используемое для обучения СНС

После получения обучающей выборки необходимо выбрать оптимальную структуру сверточной нейронной сети. Задачу работы можно отнести к сегментации изображения. В настоящее время в различных научных сферах для решения задачи сегментации изображения применяется готовая архитектура сверточной нейронной сети – U-Net, созданная в 2015 году для сегментации биомедицинских изображений в отделении Computer Science Фрайбургского университета. Архитектура сети представляет собой полносвязную свёрточную сеть, модифицированную так, чтобы она могла работать с меньшим количеством примеров (обучающих образов) и делала более точную сегментацию [1].

Архитектура сети представляет собой последовательность слоёв свёртка и пулинг (Рис. 2), которые сначала уменьшают пространственное разрешение картинки, а потом увеличивают

его, предварительно объединив с данными картинки и пропустив через другие слои свёртки. Таким образом, сеть выполняет роль своеобразного фильтра.

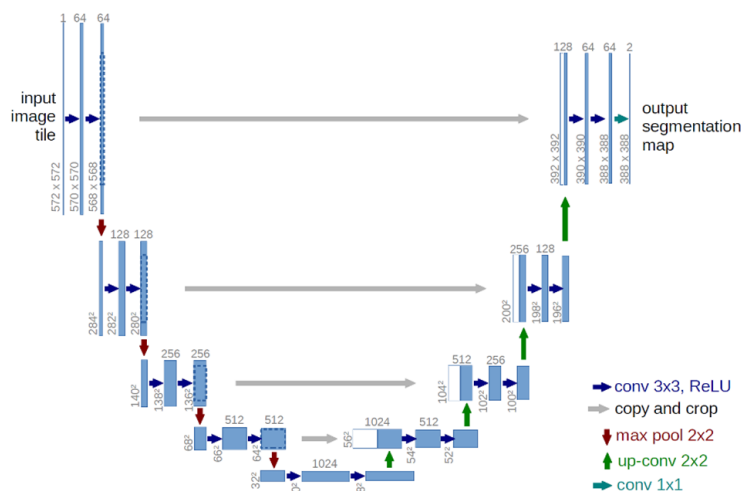


Рис. 2 Сверточная нейронная сеть U-Net [1]

Первоначальные веса U-Net определяются случайным образом. Для упрощения обучения и более качественного результата можно воспользоваться моделями глубокого обучения, доступными вместе с предварительно обученными весами. В языке программирования Python существует множество моделей, обученных сегментировать изображения: VGG, ResNet, Inception, Efficient и др. Все они обучены на выборке, состоящей из более чем 14 миллионов изображений, принадлежащих к 1000 классам. Данные сети различаются между собой количеством слоёв свертки и пулинга, но принцип действия у них схож. Для задачи выделения линейных аномалий, опытным путём, выбрана сеть VGG-16 (Рис. 3), которая состоит из 16 настраиваемых параметров: 13 слоёв свертки и 3 полносвязных слоёв. Также в данной сети присутствует 5 слоёв пулинга, которые уменьшают изображение вдвое.

Для построения собственной СНС типа U-Net с предобученными весами сети VGG-16 случайные веса левой части (декодер) сети U-Net заменены на предобученные веса сети VGG-16 и после этого СНС дообучалась на составленной выборке (Рис. 1). При обучении объем отложенной выборки для оценки точности составлял 20% для каждого датасета. В процессе обучения получена точность – 0.99.

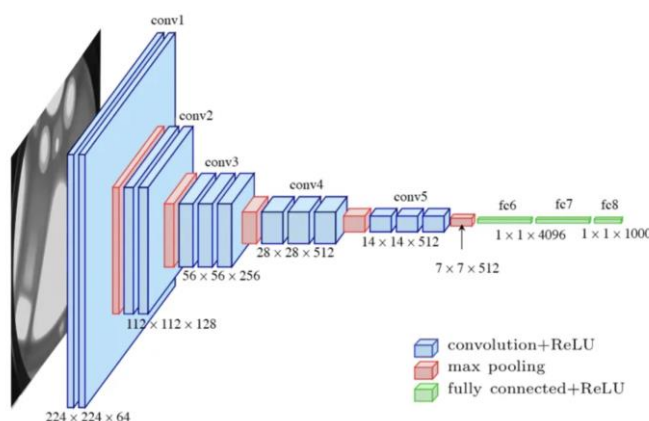
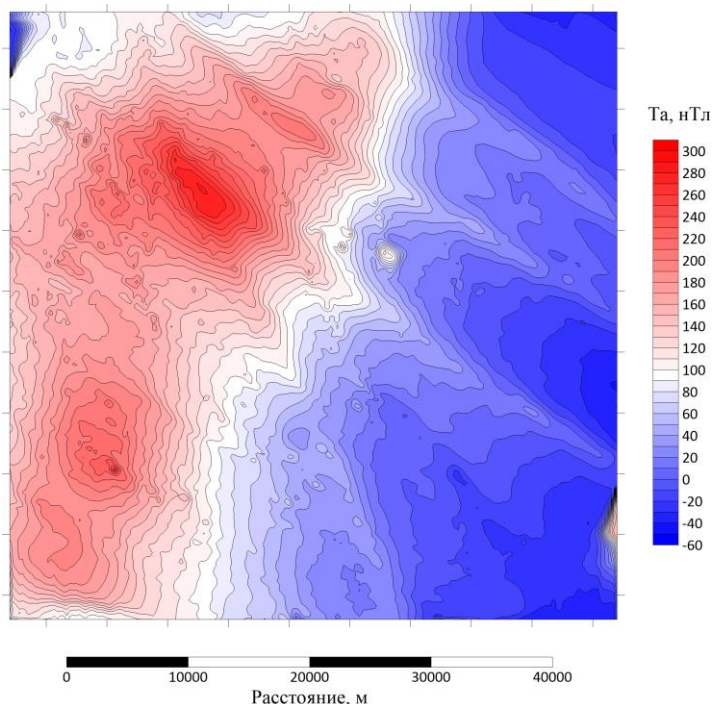


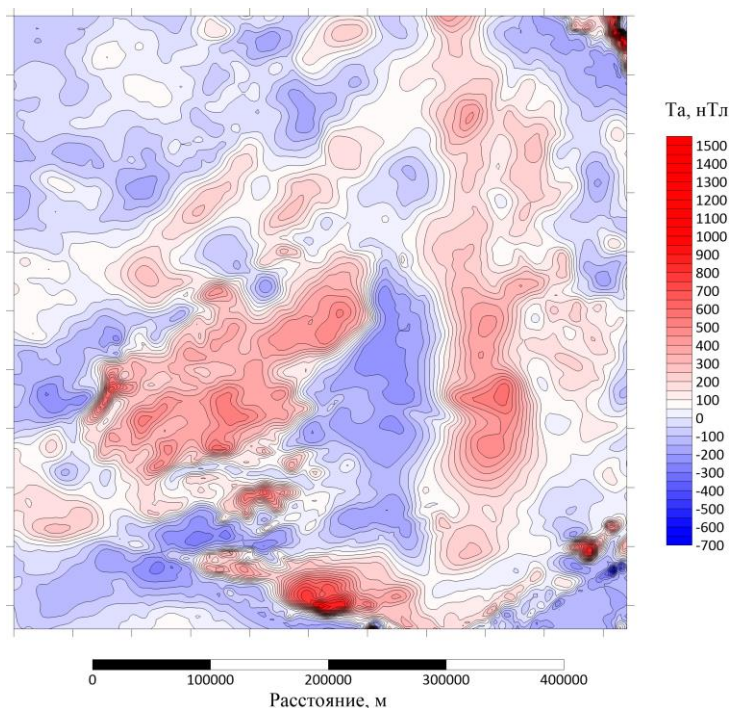
Рис. 3 Сверточная нейронная сеть VGG16 [2]

Результаты работы сверточной нейронной сети в Баренцево-Карском регионе

В качестве примера для отработки алгоритма полученной СНС использованы карты аномального магнитного поля Баренцево-Карского региона. В регионе широко распространена сеть даек различного простираения, проявленных в магнитном поле в виде линейных аномалий [3]. На рисунке 4 представлены примеры аномальных магнитных полей Баренцева и Карского морей различного масштаба.



А



Б

Рис. 4 Примеры аномальные магнитные поля. А – Баренцево море; Б – Карское море

Для тестирования рассматриваемого подхода выделения линейных аномалий на реальных примерах, использовались обученные на модельных примерах СНС. Для Баренцева моря рассматривается площадь 50×50 км, на которой, в аномальном магнитном поле, отчётливо проявляются крупные дайки. На рисунке 5 представлено сравнение результатов применения СНС (черный цвет) и результатов (желтый цвет), полученных в результате комплексной интерпретации, описанной в работе [4].

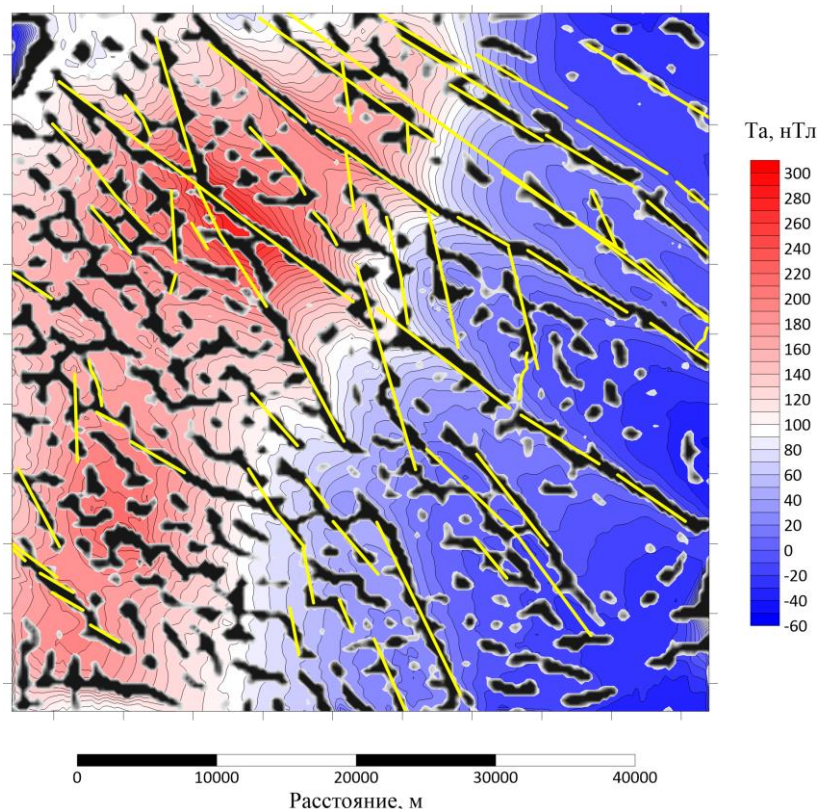


Рис. 5 Оси линейных аномалий магнитного поля, приуроченных к дайковому комплексу, полученные по результатам использования СНС (черный цвет) и по результатам комплексной интерпретации [4] (желтый цвет)

Для акватории Карского моря рассмотрен участок размером 520×520 км, на котором в магнитном поле нельзя отчётливо выделить линейные объекты. Применив к данному полю обученную СНС, можно выделить, интересующие нас линейные аномалии (Рис. 5). Полученный результат хорошо коррелирует с положительными аномалиями высокочастотной составляющей, графики которой также вынесены на рисунок 5 [5].

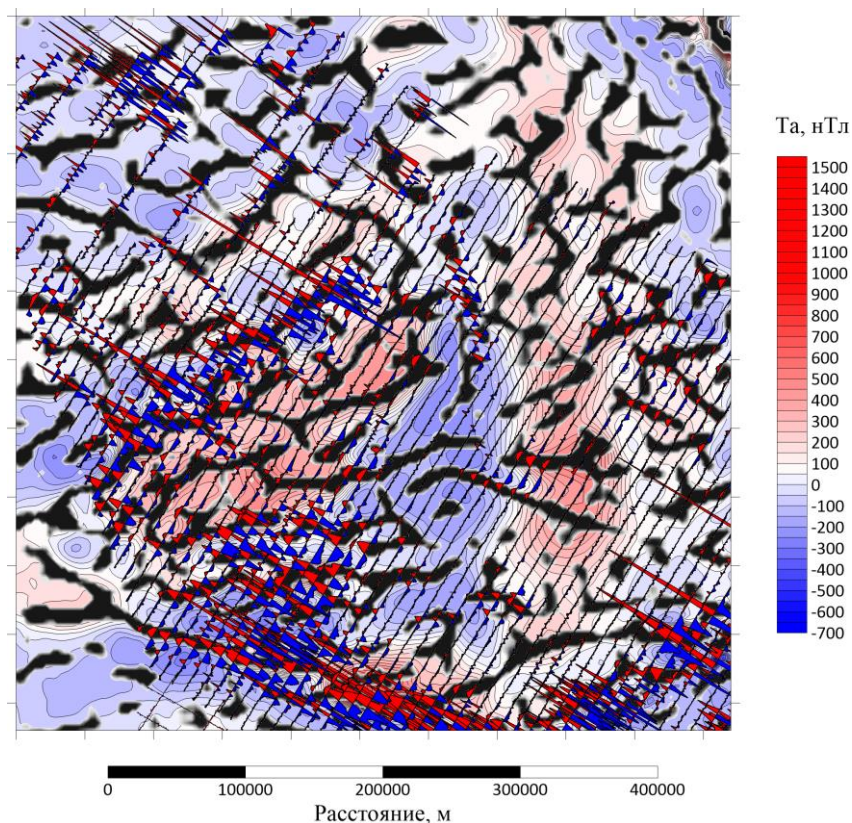


Рис. 6 Аномальное магнитное поле Карского моря с результатом работы СНС – черным цветом и нанесенными графиками высокочастотной компоненты аномального магнитного поля [5]

Заключение

В настоящее время наблюдается активное развитие тематики искусственного интеллекта. Применение алгоритмов на основе нейронных сетей позволяет решать широкий круг задач геофизики. Однако, их применение в обработки и интерпретации геопотенциальных полей встречается редко.

В ходе исследования построен и протестирован на модельных и реальных данных алгоритм на основе сверточной нейронной сети для решения задачи выделения линейных аномалий магнитного поля. Приведенные примеры для Баренцево-Карского региона, позволяют предположить, что алгоритм выделения линейных аномалий магнитного поля, может являться инструментом качественной интерпретации. Данный метод может послужить основой для разработки и усовершенствования новых подходов к решению разнообразных задач в области геофизических исследований.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках проекта «Геофизические исследования и разработка новых геофизических технологий при решении фундаментальных и прикладных задач геологии, геоэкологии и геоэнергетики», номер договора 5-15-2021, номер ЦИТИС: 121042200088-6.

Исследование выполнено в рамках реализации Программы развития Московского университета (Соглашение № 195 от 15 сентября 2022 г.) для обеспечения работы морского продольного градиентометр-магнитометра MariMag300m.

Список литературы:

1. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. Computer Science Department and BIOS Centre for Biological Signaling Studies.
2. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. ICLR 2015.
3. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Соколова Т.Б., Кузнецов К.М., Кривошея К.В. Картирование магматических комплексов по данным гидромагнитных съемок Баренцевоморского региона // Физика Земли. – 2023. – №4. – С. 96-114.
4. Черников К.С., Горбачев С.В., Голованов Д.Ю. и др. Геологическая и экономическая эффективность применения гравиразведки и магниторазведки на разных стадиях геолого-разведочных работ // Геология нефти и газа №2 2020. С. 107-120.
5. Лыгин И.В., Арутюнян Д.А., Кузнецов К.М., Соколова Т.Б., Рогозева М.А. Картирование Мезозойского даечного комплекса в Баренцевом и Карском морях по магнитному полю. // Сборник материалов международной научно-практической конференции Геосочи-2023. Актуальные проблемы геологии и геофизики. — Т. 1. — ООО ПолиПРЕСС г. Тверь: 2023. — С. 113–117.

УДК 550.8.05

Рубрика 37.25.29

ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА 3D СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ
ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА НА МЕЛКОВОДНЫХ УЧАСТКАХ
АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА

3D SEISMIC DATA ANALYSIS TECHNOLOGIES FOR STUDYING THE UPPER PART OF
THE GEOLOGICAL SECTION IN THE ARCTIC SHELF SHALLOW AREAS

**Терехина Яна Евгеньевна¹, Токарев Михаил Юрьевич¹, Понимаскин Алексей
Игоревич², Соловьева Марина Андреевна², Хлебникова Оксана Александровна¹,
Горбачев Сергей Викторович³**

¹ *Геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

² *ООО "Центр анализа сейсмических данных МГУ им. М.В. Ломоносова", г. Москва*

³ *ООО "РН-Шельф-Арктика", г. Москва*

**Terekhina Yana Evgenievna¹, Tokarev Mikhail Yurievich¹, Ponimaskin Alexey Igorevich²,
Solovyeva Marina Andreevna², Khlebnikova Oxana Aleksandrovna¹, Gorbachev Sergey
Viktorovich³**

¹ *Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *LLC " Seismic Data Analysis Center Lomonosov Moscow State University", Moscow*

³ *LLC "RN-Shelf-Arctic", Moscow*

В рамках освоения Арктического региона наиболее актуальным на данный момент является изучение мелководных районов шельфа. На начальной стадии ведения хозяйственных работ необходимо проведение территориального планирования. При этом обязательным является анализ опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ) верхней части разреза (ВЧР) (СП 504.1325800.2021). Максимальное покрытие зон интересов имеют данные 3D сейсморазведки. В данной работе рассмотрены возможности адаптации этих данных для изучения ВЧР на примере Печорского моря.

При применении стандартной сейсморазведки для анализа первой 1000м есть ряд очевидных недостатков: разрешающая способность, низкая кратность. Так же ограничения накладывает глубина воды акватории, в районе работ она колеблется от 12 до 25 м. Несмотря на это при применении специализированной обработки можно получить информацию о ОГПиЯ.

Стандартный граф обработки данных сейсморазведки предполагает применение большого числа процедур, которые могут негативно сказываться на изображении верхней части разреза, искажать амплитуды и геометрию границ в ВЧР. Такими процедурами являются поверхностно-согласованные амплитудные поправки и деконволюция, различного рода статические поправки (как низкочастотные, так и высокочастотные остаточные сдвиги). Также многоканальные процедуры шумоподавления (такие как преобразование Радона и т.д.) могут

вносить свои артефакты, поскольку на малых временах длины годографов и, соответственно кратность в сейсмограммах крайней малы. Поэтому обработка данных должна производиться отдельно от основной обработки и не должна содержать процедур, искажающих отражения в ВЧР.

Ниже представлено авторское видение видов результатов обработки и последовательности интерпретации данных стандартной 3D сейморазведки для анализа ВЧР. Так, например, для определения опасностей вдоль ствола скважины от 400 до 1000 м возможно использовать данные после стандартной обработки. А для анализа интервала 0-100 м могут быть использованы технические каналы - данные с гидрофонов ближней зоны.

Таблица 1. Схематическое представление последовательности обработки и интерпретации.

Обработка	Исходные данные 3D СР							Результат
	Стандартная обработка	Специализированная обработка для интервала по грунту 100-1000 м. Буксируемые косы (выносы до 2000 м, время до 1500 мс)			Специализированная обработка для интервала по грунту 0-100 м. Ближние выносы, датчик ближней зоны, буксируемые косы (выносы до 3000 м, время до 7000 мс)			
		Куб «структурный»	Куб «структурный»	Куб «динамический»	Куб «высокого разрешения»	Временные разрезы ближних выносов. Куб ближних выносов	Временные разрезы датчика ближней зоны. Куб датчика ближней зоны	
Подготовительная работа	Формирование интерпретационного проекта. Анализ региональной геологической информации. Анализ инженерно-геологических условий							Структурные карты. Трассирование тектонических нарушений. Выделение ОГПиЯ. Ранжирование ОГПиЯ. Рекомендации.
Структурная интерпретация	Корреляция горизонтов 400-1000 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.	Корреляция горизонтов 150-400 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.			Корреляция горизонтов 0-150 мс. Стратиграфическая привязка. Анализ кинематических атрибутов. Анализ когерентности.			
Анализ скоростей	V_p (МПВ)	V_p (ОГТ)			V_s (MASW, SWT)			
Динамическая интерпретация		Анализ частотно-временных трансформант. Анализ динамических атрибутов. AVO-анализ.			Анализ частотно-временных трансформант. Анализ динамических атрибутов.			
Последовательная акустическая инверсия	Акустическая инверсия	Акустическая инверсия			Акустическая инверсия			

Используя большой объем доступных материалов на территории Баренцево-Карского шельфа была разработана методика специализированной обработки и комплексной интерпретации данных 2D/3D сейморазведки с данными инженерно-геологических изысканий для изучения строения верхней части разреза и поиска опасных геологических процессов и явлений. Данная технология актуальна на этапе территориального планирования с целью оценки геологических условий и выбора наиболее оптимальных участков для поисково-разведочного бурения и строительства для последующего освоения.

Список литературы:

1. СП 504.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Общие требования». 2021
2. Архипов Н.Д., Терёхина Я.Е., Пенкин А.А., Горбачёв С.В. Методика проведения кластеризации для выделения типов сейсмических волновых картин с целью автоматического обнаружения и прогноза аномалий верхней части разреза // 3-я научно-практическая конференция и выставка «Морские Технологии 2021», Геленджик, 26-30 апреля 2021.
3. Вакуленко С.А., Понимаскин А.И., Токарев М.Ю., Горбачев С.В., Гурвич Л.А. ООО Применение технологии многоканального анализа поверхностных волн (MASW) для решения задач оценки свойств придонных отложений по результатам 2D/3D сейсмической

съемки с донным оборудованием на шельфе Печорского моря // 3-я научно-практическая конференция и выставка «Морские Технологии 2021», Геленджик, 26-30 апреля 2021.

4. Токарев М.Ю., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Бирюков Е.А., Колюбакин А.А., Горбачев С.В. Перспективные сейсмические технологии для инженерно-геологических изысканий на мелководном шельфе // Геофизика, №2, 2021, с 3-11.

УДК 551.46.06

Рубрика 37.25.00

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ПУЗЫРЬКОВЫХ МЕТАНОВЫХ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЙ И ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В БУХТЕ ЛАСПИ (КРЫМ)

SEASONAL DYNAMICS OF BUBBLY METHANE GAS EMISSIONS AND HYDROLOGICAL PARAMETERS IN LASPI BAY (CRIMEA)

Будников Андрей Александрович¹, Иванова Ирина Николаевна¹, Хурчак Алена Игоревна², Малахова Татьяна Владимировна²

¹ МГУ имени М.В.Ломоносова, город Москва

² ФИЦ ИнБЮМ, Севастополь

Budnikov Andrey Aleksandrovich¹, Ivanova Irina Nikolaevna¹, Khurchak Alena Igorevna², Malakhova Tatyana Vladimirovna²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow

² IBSS, Sevastopol

Введение

Метановые пузырьковые газовыделения из морского дна (сипы) распространены на Черноморском шельфе, в том числе, вдоль южного побережья Крыма [1, 2]. Выделение газа может носить как сезонный характер, так и быть постоянным в течение всего года [2]. Постоянно действующие сипы представляют отдельный интерес для исследований их воздействия на окружающую среду, а также для определения причин, вызывающих наблюдаемые вариации газового потока. Один из таких районов постоянной метановой разгрузки находится в бухте Ласпи (рис.1).

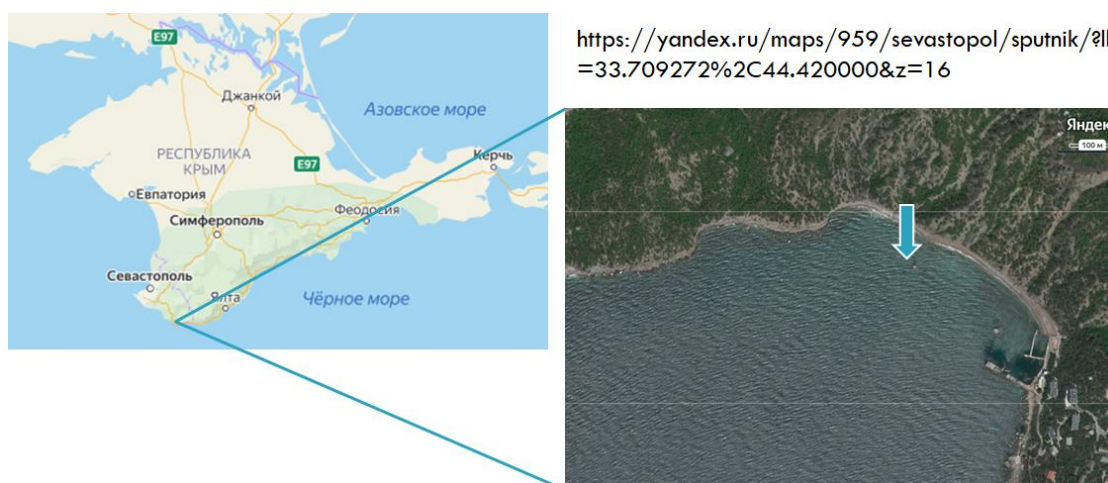


Рис.1. Место проведения исследований (бухта Ласпи, Южный берег Крыма, 44.42099°N; 33.70766°E)

Измерение пузырькового потока проводилось пассивным акустическим методом: рядом с точкой выхода пузырьков располагался гидрофон, регистрирующий акустический сигнал, производимый пузырьками. Частотная характеристика этого сигнала в совокупности с временной разверткой позволяет определить выделяющийся объем газа и его изменение во времени [3].

Измерения гидрологических параметров, а также модуль скорости и направления движения морской воды над сипом измерялись при помощи многопараметрического зонда RCM 9 LW AANDERAA INSTRUMENTS (Норвегия). Во время измерений зонд RCM 9 размещался непосредственно над действующим сипом, при этом расстояние от дна до датчиков составляло около 30 см (рис.2). В феврале, мае и июне 2023 года одновременно с измерениями над сипом были проведены измерения гидрологических параметров на удаленной от сипа площадке, принятой за фоновую, которая находилась на расстоянии порядка 150 м вдоль берега западнее. Измерения на фоновой площадке также выполнялись прибором производства AANDERAA INSTRUMENTS, имеющим аналогичный набор датчиков.

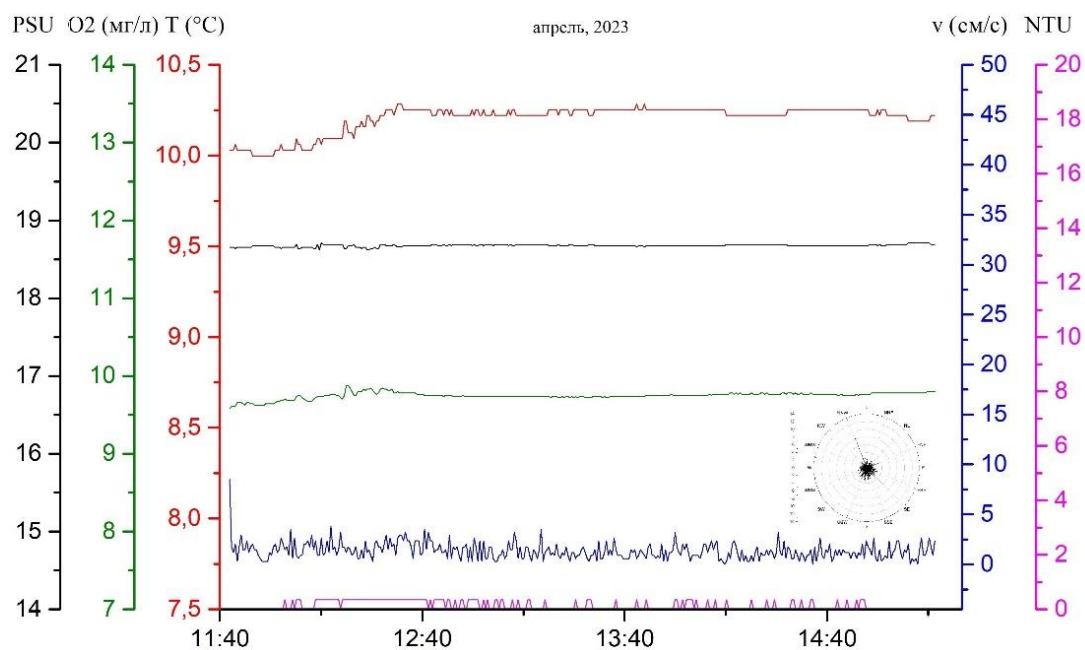
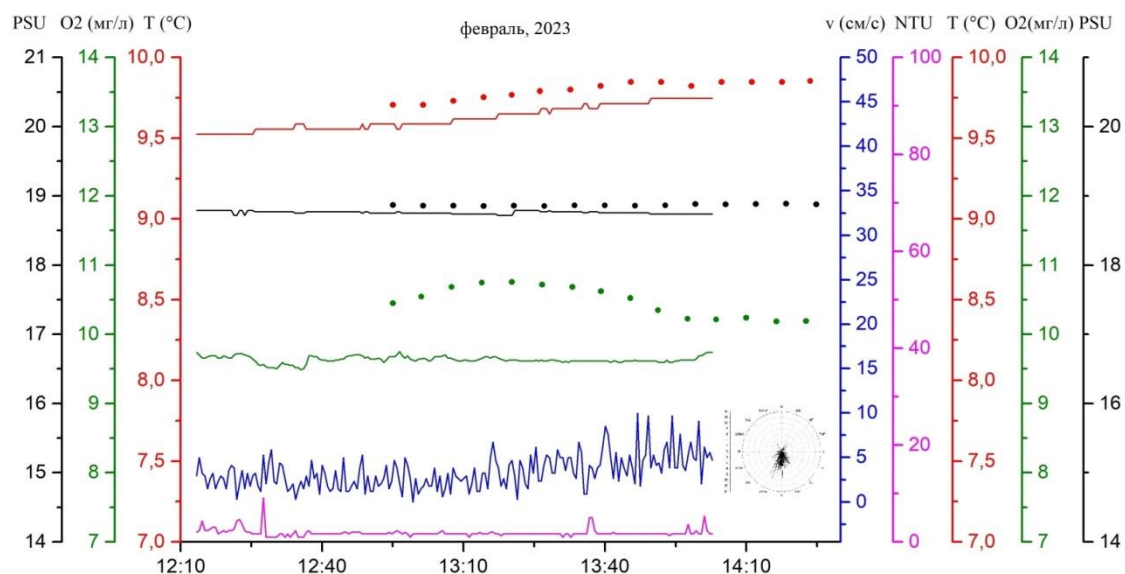


Рис.2. Подводная фотография сипа в бухте Ласпи.

Изменяемые параметры: температура T (точность/разрешение датчика $\pm 0.05/0.03^\circ\text{C}$), электропроводность S (точность/разрешение датчика $\pm 0,018 \text{ мС}\cdot\text{см}^{-1}/0,002 \text{ мС}\cdot\text{см}^{-1}$), концентрация растворенного кислорода O_2 (точность/разрешение датчика $< 8 \text{ }\mu\text{моль/л}$ (либо 5% от величины)/ $< 1 \text{ }\mu\text{моль/л}$), мутность TU (точность/разрешение датчика $\pm 10/0.5 \text{ NTU}$), скорость v (точность/разрешение датчика $1\%/0.3 \text{ см/сек}$), направление скорости (точность/разрешение датчика $\pm 5^\circ/0.35^\circ$). Показания датчиков над сипом снимались каждые 34 секунды, на фоновой станции – каждые 120 секунд. Значение солёности рассчитывалось по измеренным значениям температуры и электропроводности [4]. В мае и июне для измерения гидростатического давления в точке газовыделений использовался высокоскоростной логгер RBR-duet (точность/разрешение датчика $\pm 0.025/0.0005 \text{ дбар}$).

Результаты

Результаты измерений гидрологических параметров представлены на рис.3, примеры акустических записей, полученных от источника пузырькового газа представлены на рис.4.



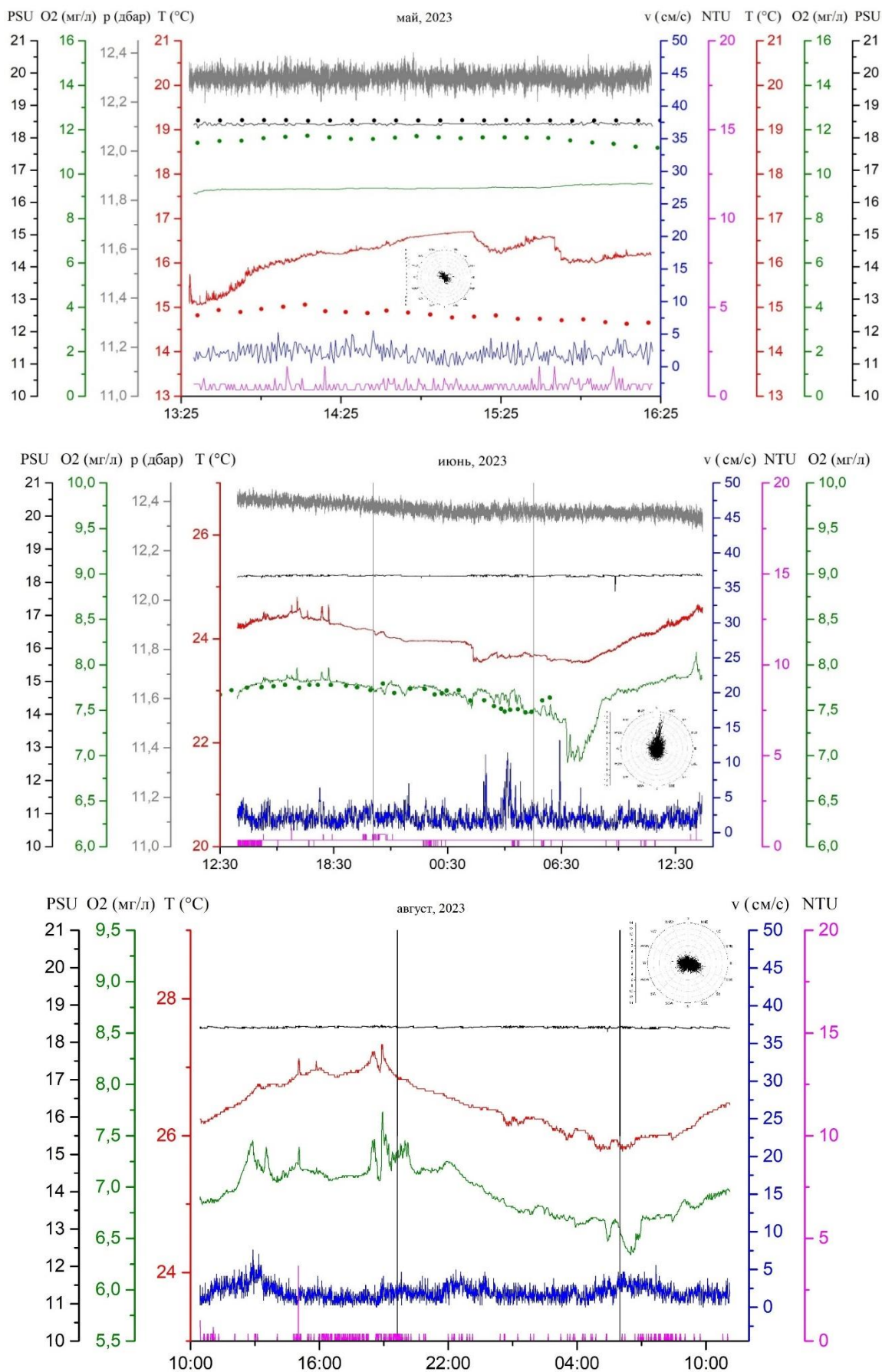


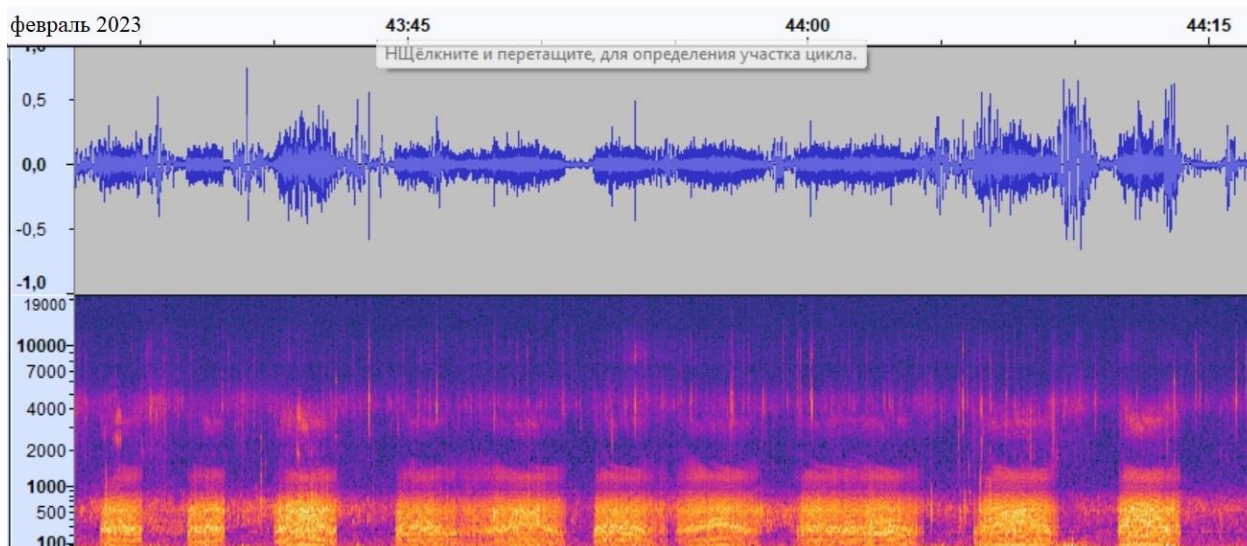
Рис.3. Изменение гидрологических параметров со временем в феврале, апреле, мае, июне и августе 2023 года в точке газовыделений (сплошные кривые) и на фоновой станции (точки). Также представлена диаграмма направлений скорости движения морской воды

за время измерений. В июне и августе вертикальными линиями отмечены заход и восход солнца.

За все время наблюдений волнение не превышало 2-х баллов. Движение воды над пузырьковым источником было разнонаправленным, скорость движения не превышала 10 см/с в феврале и 5 см/с в остальные месяцы за исключением июня, в котором наблюдались кратковременные увеличения скоростей потоков до 13 см/с, направленных к берегу. Мутность была близка к нулю.

В изменении температуры прослеживались суточные тренды, а также присутствовали достаточно быстрые изменения порядка половины градуса. Изменение содержания кислорода в целом коррелировало с изменением температуры, но при этом иногда наблюдались резкие скачки значений, достигающие 0.5 мг/л, которые не сопровождались какими-либо температурными изменениями. Соленость оставалась практически неизменной около 18.4 PSU. В феврале и мае наблюдаемые значения концентрации кислорода и солености на фоновой станции были выше, чем над газовыделяющей площадкой. Температура на фоновой станции в феврале была выше, а в мае ниже измеренных значений над площадкой. В июне существенных отличий в содержании кислорода не наблюдалось.

Визуальные наблюдения, а также анализ акустических данных показал наличие пузырькового потока во все месяцы наблюдений, однако, характер газовойделений несколько отличался. В феврале и апреле пузырьки из источника выходили небольшими группами (кластерами), в мае наблюдались более продолжительные кластеры, частота выхода пузырьков в которых при этом была меньше примерно в 2 раза по сравнению с предыдущими месяцами. В то же время наблюдались и короткие кластеры продолжительностью в несколько секунд с более высокой частотой выхода пузырьков. В июне и августе кластеры также были более продолжительными (см. рис.4).



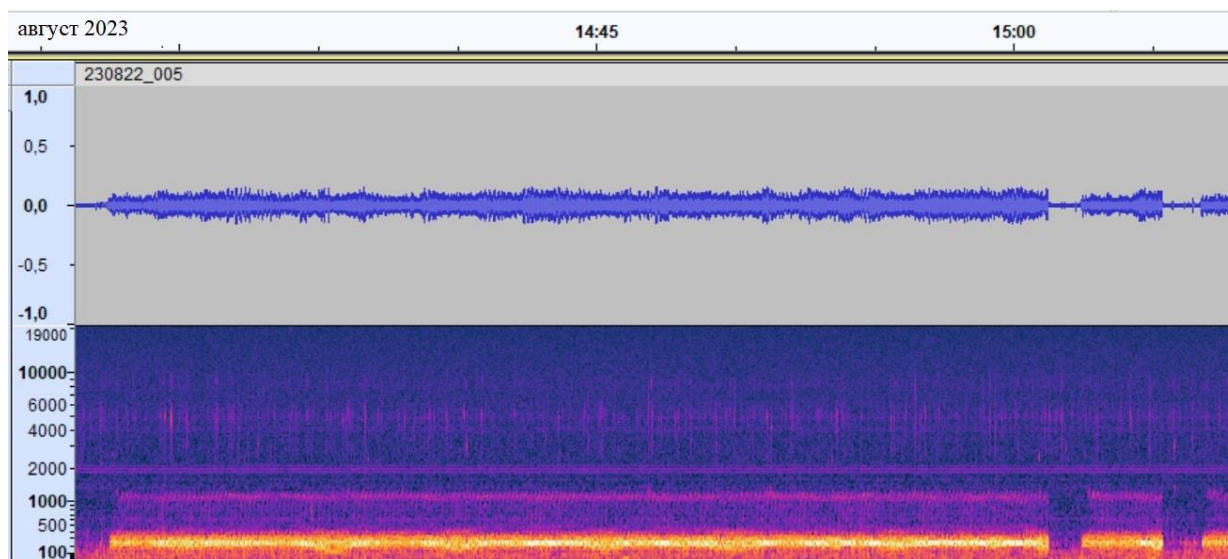


Рис.4. Примеры акустических записей. Фрагмент волнограммы и спектрограммы сигнала от источника пузырьков (февраль и август 2023 г.).

Объем газовыделений, рассчитанный при помощи акустических записей составил в феврале - 34 л/сут., в мае - 25 л/сут, в июне - 43 л/сут, в августе 45 л/сут.

Выводы

1. Подтверждена круглогодичная активность сипа в бухте Ласпи.
2. Отмечены кратковременные эпизоды скачкообразного изменения значений кислорода и температуры не сопровождавшиеся изменением других параметров.
3. Не было зарегистрировано существенных изменений солености, что говорит о том, что газовые высачивания не сопровождались импульсной субмаринной разгрузкой пресной воды, которая может сопровождать газовую разгрузку.
4. Показано, что интенсивность газовыделений из источника пузыркового газа изменяется в течение года в пределах от 25 до 45 л/сут

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-27-00379, <https://rscf.ru/project/23-27-00379/>)

Список литературы:

1. Егоров В.Н., Артемов Ю. Г., Гулин С.Б. Метановые сипы в Чёрном море; средообразующая и экологическая роль. Под ред. Г.Г. Поликарпова. Севастополь: НПЦ "ЭКОСИ-Гидрофизика". – 2011. С.405.
2. Малахова Т. В., Егоров В. Н., Малахова Л. В., Артёмов Ю. Г., Пименов Н. В. Биогеохимические характеристики мелководных струйных метановых газовыделений в прибрежных районах Крыма в сравнении с глубоководными сипами Чёрного моря //

Морской биологический журнал. 2020. Т. 5, № 4. С. 37-55.
<https://doi.org/10.21072/mbj.2020.05.4.04>

3. Longo M., Lazzaro G., Caruso C.G. et al. Black sea methane flares from the seafloor tracking outgassing by using passive acoustics. // *Frontiers in Earth Science*. – 2021. 9:678834. doi: 10.3389/feart.2021.678834
4. Зори А.А., Коренев В.Д., Хламов М.Г. Методы, средства, системы измерения и контроля параметров водных сред. – Донецк: РИА ДонГТУ, – 2000.

УДК 550.8.012

Рубрика 37.01.05

К ВОПРОСУ О РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

TO THE MATTER OF SEISMOACOUSTIC SURVEYS RESOLUTION

**Токарев Михаил Юрьевич^{1,2}, Токарев Александр Михайлович², Понимаскин
Алексей Игоревич², Яковенко Артем Дмитриевич^{1,2}**

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

² Центр анализа сейсмических данных МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Tokarev Mickhail^{1,2}, Tokarev Alexander², Ponimaskin Alexey², Iakovenko Artem^{1,2}

¹ Moscow State University, Moscow

² Moscow State University Seismic Data Analysis Center, Moscow

Введение

Традиционной характеристикой качества сейсмических данных является величина вертикальной разрешающей способности R_s . Под ней обычно понимают минимальную временную мощность слоя dT_{\min} , при которой волны, отраженные от его кровли и подошвы, удастся идентифицировать отдельно друг от друга, т. е. $dT_{\min} = 2T_u$, где T_u — длительность зондирующего импульса $f(t)$. Такое определение соответствует понятию «полного разрешения». В то же время для обнаружения слоя зачастую достаточно информации об изменении формы отражения от кровли пласта при интерференции с отражением от подошвы пласта. Согласно критерию разрешенности по Рэлею [Rayleigh, 1879] две интерферирующие волны должны быть разделены перегибом, т.е. производная должна менять знак. В этом случае минимальная временная мощность слоя, отражение от кровли и подошвы которого могут быть разрешены, должна превышать $\frac{1}{4}$ периода центральной частоты импульса. Критерий разрешенности по Рикеру - временной интервал, равный интервалу между точками перегиба. Если исходить из этих положений, то повышение разрешающей способности связано только с сокращением длительности импульса или повышением центральной частоты. Подобное предположение представляется неполным и, во многом, неверным. Определение разрешающей способности в указанных критериях появилось, когда задачей сейсморазведки было в основном изучение кинематики волн, а единственной количественной характеристикой разреза (кроме скорости) являлась мощность слагающих его пластов. В настоящее время перед сейсморазведкой стоит задача обеспечения достоверными данными выделения более сложных объектов (например, сейсмокомплексов, сейсмофаций), характеризующихся набором как кинематических, так и динамических признаков, в той или иной степени выраженных на сейсмической записи. В связи с этим, при определении требований к разрешающей способности наблюдений, приходится использовать параметры, связанные не только с обнаружением геологического тела малой мощности, но и с достоверным определением его кинематических (временной мощности, латеральных размеров, положения кровли и т.д.) и динамических (коэффициентов отражения, добротности, акустической жесткости, AVO-

параметров и т.д.) параметров. Для определения разрешающей способности сейсмических наблюдений в широком смысле, т.е. для обнаружения объекта, определения его кинематических и динамических характеристик, удобен подход Уайдесса [Widess, 1973], позволяющий оценить изменения кинематических и динамических параметров отражения от слоя, при уменьшении его мощности для различных зондирующих сигналов (Рисунок 1).

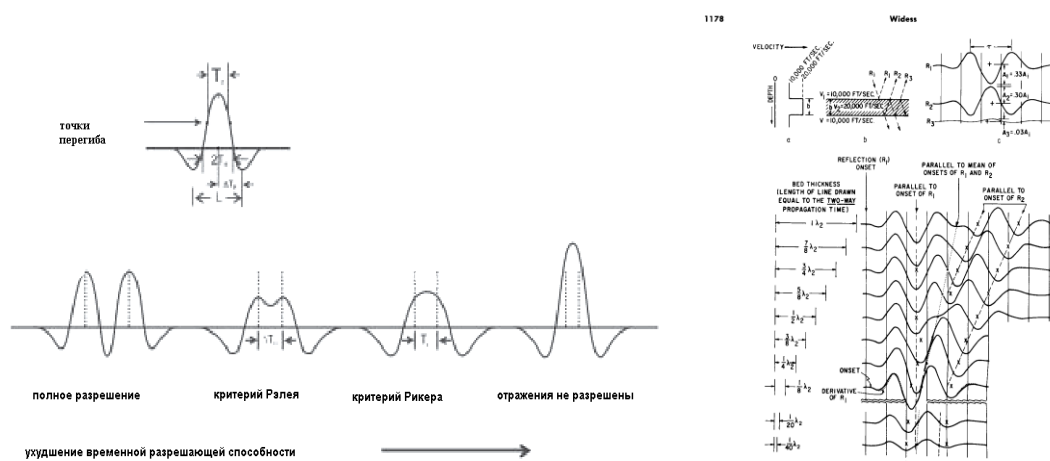


Рисунок 1. Сравнение подходов к оценке разрешающей способности по Рэлею, Рикеру и Уайдессу [Widess, 1973].

При таком подходе становится ясно, что повышение разрешенности сейсмической записи сводится к улучшению формы результирующего импульса $g(t)$, т. е. приведению его к виду, максимально отвечающему поставленной задаче в заданных сейсмогеологических условиях. Так для решения задач «обнаружения» геологического объекта и определения его «кинематических» и «динамических» характеристик в работе был предложена оптимизация формы спектра (Рисунок 2) [Калинин и др., 1992] при его фиксированной ширине для получения результирующего импульса с максимально узким центральным пиком, максимально быстро спадающей и максимально гладкой временной функцией соответственно.

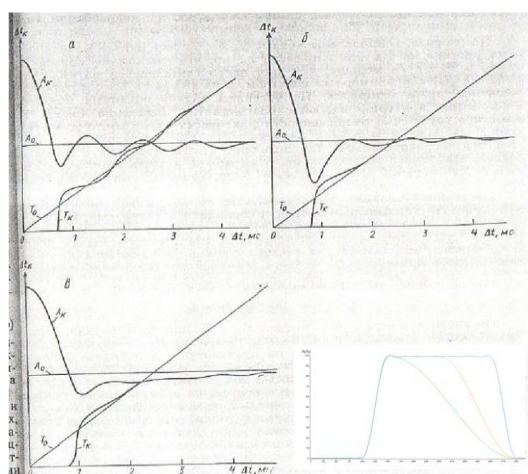


Рисунок 2. Сейсмические сигналы, функции «кажущейся» временной мощности пласта (время между экстремумами) – А, Б, В и их амплитудные спектры.

А. Оптимальная форма сигнала для «обнаружения» геологического объекта

$$S_0(\omega) = 1; \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2;$$

$$S_0(\omega) = 0; \omega < \omega_1; \omega > \omega_2$$

Б. Оптимальная форма сигнала для определения «динамических» характеристик объекта

$$S_0(\omega) = \cos \frac{\pi(\omega - \omega_1)}{\omega_2 - \omega_1} 1; \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2;$$

$$S_0(\omega) = 0; \omega < \omega_1; \omega > \omega_2$$

В. Оптимальная форма сигнала для определения «кинематических» характеристик объекта

$$S_0(\omega) = \omega^{-1} \cos \frac{\pi(\omega - \omega_1)}{\omega_2 - \omega_1} 1; \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2;$$

$$S_0(\omega) = 0; \omega < \omega_1; \omega > \omega_2$$

В дальнейшем предложенный подход был неоднократно использован при проведении специализированной обработки сейсмических данных с целью идентификации опасных геологических процессов и явлений на шельфе (Рисунок 3) [Ампилов и др., 2018]

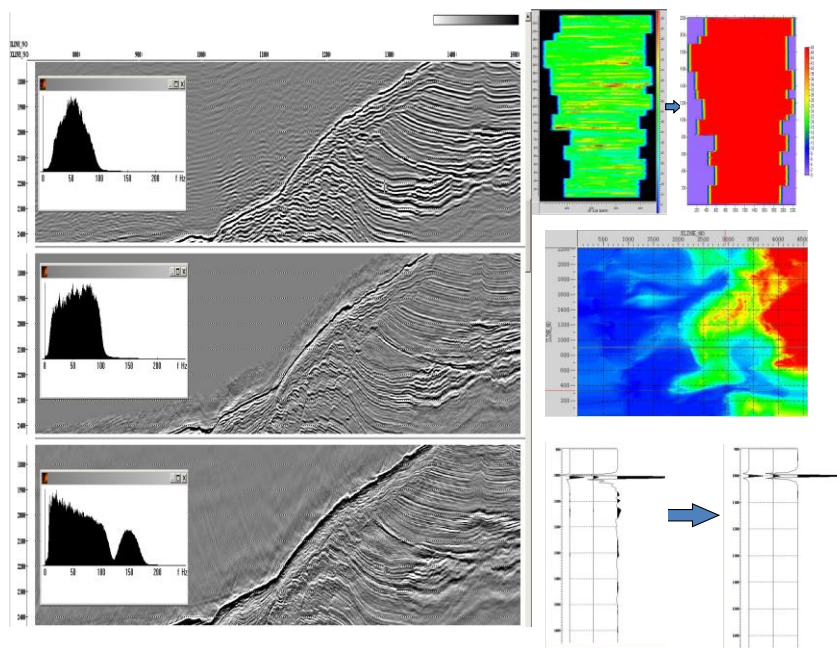


Рисунок 3. Пример результатов специализированной обработки данных стандартной 3D сейсморазведки на акватории Черного моря в 2008 гг.

А. Оптимальная форма сигнала для определения «динамических» характеристик объекта и карты кратности до и после регуляризации

Б. Оптимальная форма сигнала для определения «кинематических» характеристик объекта и детальное скоростное поле

В. Оптимальная форма сигнала для «обнаружения» геологического объекта и зондирующий сигнал без и с учетом влияния свободной поверхности воды.

Решение каждой задачи имеет свои особенности: «обнаружение» требует максимальной разрешающей способности, даже в ущерб отношению сигнал/шум, «структурные» задачи – максимальной точности построения скоростной модели для восстановления формы отражающих границ, «динамический» анализ – максимального отношения сигнал/шум, с

использованием регуляризации, даже в ущерб разрешающей способности в плане и по глубине.

Оценка вертикальной разрешающей способности мультимастотных сейсмических наблюдений

Оценим эффективность использования мультимастотных наблюдений на примере сравнения результатов наблюдений сейсмозаписки высокого, сверхвысокого, ультравысокого разрешения (СВР, ССВР, СУВР) и их специализированной обработки с объединением данных на тестовом полигоне в Охотском море.

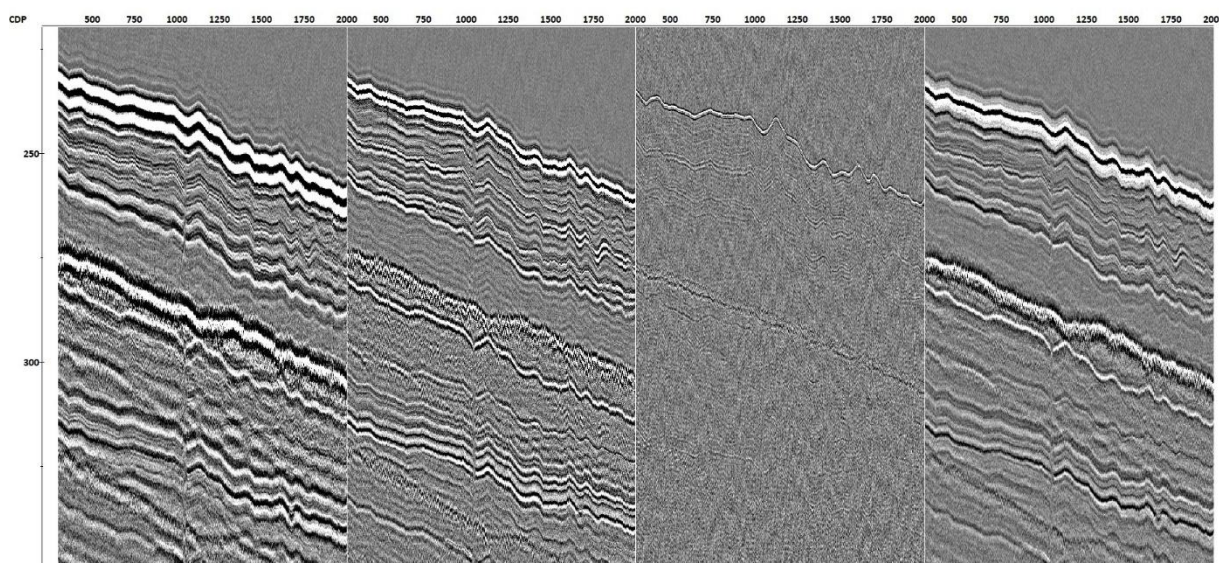


Рисунок 4. Сравнение типов сейсмических исследований в различных сейсмических диапазонах. Слева на право: СВР, ССВР, СУВР, СВР + ССВР+СУВР [Pirogova et. al., 2022]..

Для оценки разрешающей способности сейсмозаписки различных типов формой рассмотрим результаты определения времен вступления и амплитуд отраженных волн на модельных сейсмотрассах, полученных при нормальном падении упругих волн на выклинивающийся слой мощностью 0-13,5 метров на дне (Модель 1), на глубинах ≈ 50 и ≈ 500 м по грунту (Модель 2, 3) с параметрами, характерными для палеорусел или газонасыщенных осадков на соответствующих глубинах (Таблица 1).

Таблица 1. Параметры моделей.

		Приповерхностная модель (придонные отложения)	Малоглубинная модель (газонасыщенные отложения)	Глубинная модель (отложения палеоруслу)
Верхнее полупространство	Vp1	1500	1600	2000
	ρ_1	1	1,4	2
Слой	Vp2	1500	1000	3000
	ρ_2	1,3	1,4	2,4
Нижнее полупространство	Vp3	1600	1700	2100
	ρ_3	1,4	1,4	2
Коэф. отражения на кровле	K1	0,13	-0,20	0,25
Коэф. отражения на подошве	K2	0,07	0,27	-0,18

В качестве падающих импульсов будем использовать нуль-фазовые зондирующие импульсы, характерные для результатов следующих видов обработки (Рисунок 5):

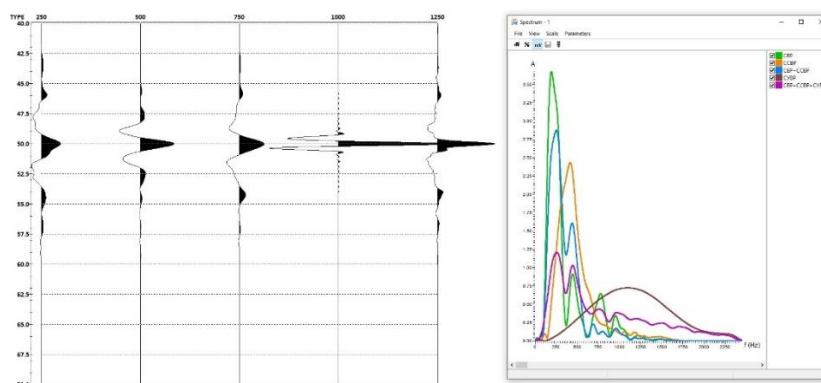


Рисунок 5. Сигналы для построения моделей. Слева направо: СВР, ССВР, СВР+ССВР, СУВР, СВР+ССВР+СУВР.

В докладе представлен результат свертки трасс коэффициентов отражения, соответствующих кровле и подошве «клина», и нуль-фазового сигнала, полученного синфазным суммированием донного отражения после обработки данных. Также представлены графики отношений между истинной амплитудой сигналов, отраженных от кровли и подошвы, и кажущейся (красная и синяя пикировка TOP_RATIO_AMP и BOT_RATIO_AMP соответственно), и отношение видимой мощности слоя к истинной (зеленый график d_time). Были оценены три аспекта вертикальной разрешающей способности:

Разрешающая способность по Рикеру будет соответствовать пересечению d_time и TOP_RATIO_AMP ;

Разрешающая способность по «мощности», то есть при какой мощности слоя его истинная мощность будет соответствовать кажущейся. На графике значения d_time равны 1;

Разрешающая способность по «амплитуде», то есть при какой мощности слоя интерференция сигналов будет незначительна, и амплитуды в кровле/подшве будут соответствовать истинным. На графике, когда top/bot_ratio_amp будут принимать значения коэффициента отражения границы.

Все сигналы, с которыми производилась свертка, нормированы, и их максимальная амплитуда равна 1.

На рисунках ниже (Рисунок 6, Рисунок 7, Рисунок 8, Рисунок 9, Рисунок 10) приведена волновая картина для слоя, характерного для приповерхностных осадков, выходящих на дно. На рисунках график d_time – отношение видимой мощности слоя к истинной, top_ratio_amp и bot_ratio_amp – отношения между истинной амплитудой сигналов, отраженных от кровли и подошвы, и кажущейся. Разрешение по обнаружению (1) Разрешение по мощности (2) Разрешение по амплитуде (3).

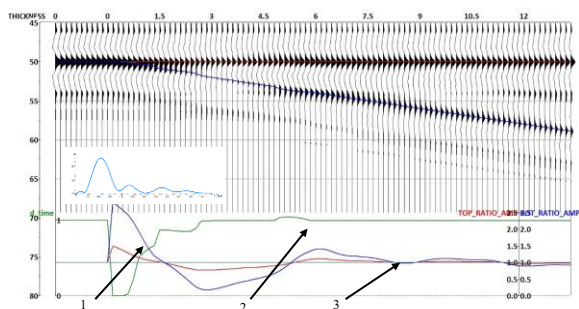


Рисунок 6. Модель 1. Свертка с сигналом СВР.

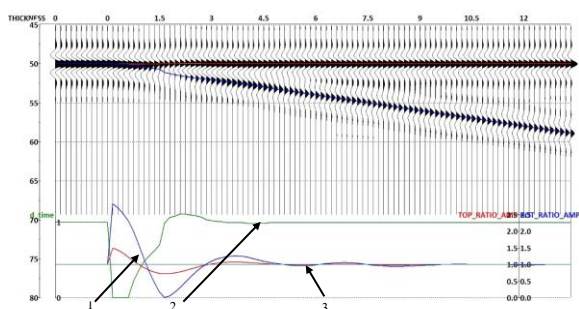


Рисунок 7. Модель 1. Свертка с сигналом ССВР.

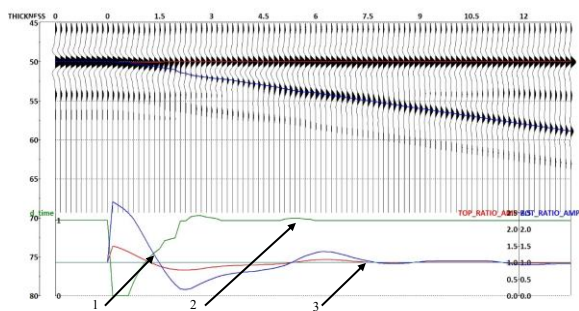


Рисунок 8. Модель 1. Свертка с суммированным сигналом СВР+ССВР.

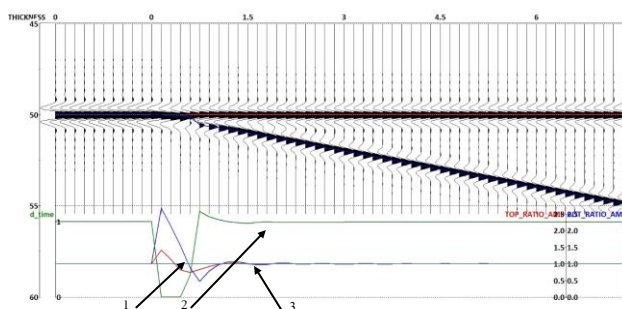


Рисунок 9. Модель 1. Свертка с сигналом СУВР.

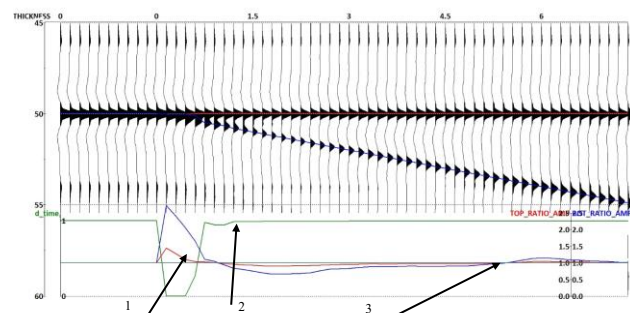


Рисунок 10. Модель 1. Свертка с суммированным сигналом СУВР+СВР+ССВР.

В случае с моделью придонного слоя получилось, что разрешающая способность по Рэлею одинакова для приповерхностных систем, улучшается в случае СУВР+СВР+ССВР и максимальная для СУВР. Разрешающая способность по мощности для суммированных сигналов лучше, чем для разделенных. А разрешающая способность по амплитуде от лучшего к худшему: СУВР, СУВР+ССВР+СВР, СВР+ССВР, ССВР, СВР.

Для моделей 2 и 3 в докладе приводятся аналогичные иллюстрации

Выводы

В результате объединения наборов данных ССВР и СВР, полученных с приповерхностными приемно-излучающими системами, удалось построить сейсмическое изображение среды,

характеризующееся высоким отношением сигнал/шум, вертикальным разрешением порядка 2 м в приповерхностной части разреза и глубиной до 550 метров (от морского дна). Результат объединения данных СУВР, ССВР и СВР, зарегистрированных на заглубленную приемную линию, позволяет изучать приповерхностные и малоглубинные процессы с предельно высокой разрешающей способностью до 0,5 м в первых десятках метров по грунту. Такой подход к получению широкополосных сейсмических изображений по мультимастотным данным СВР, ССВР и СУВР представляется наиболее эффективным при изучении ВЧР и анализе опасных геологических процессов и явлений по сейсмическим данным.

Проведенная работа позволяет сделать следующие выводы:

Регистрация прямой волны заглубленной сейсмокосой от приповерхностного источника позволяет скомпенсировать влияние водной поверхности в источнике (подавить волну-спутник в источнике) в данных, полученных с приповерхностной приемно-излучающей системой.

Регистрация прямой волны от заглубленного источника приповерхностной сейсмокосой позволяет компенсировать влияние водной поверхности на сигнал в приемной косе (подавить волну-спутник в приемнике).

Суммирование данных, полученных с приповерхностными приемно-излучающими системами в двух частотных диапазонах, с компенсированным влиянием водной поверхности за источник и приёмник, после приведения к нуль-фазовому сигналу, позволяет достичь максимальной глубинности и разрешающей способности в заданном частотном диапазоне.

Объединение данных СВР и ССВР с приповерхностными приемными системами позволяет выявлять опасные геологические процессы для бурения с максимальной эффективностью.

Объединение данных СУВР, полученных с заглубленной приемно-излучающей системой, с данными СВР и ССВР, полученными при помощи приповерхностных источников и заглубленной приемной линии, после приведения к нуль-фазовому сигналу, позволяет достичь максимальной разрешающей способности в диапазоне глубин, соответствующему заглублению системы СУВР.

Объединение данных СВР, ССВР и СУВР позволяет выявлять опасные малоглубинные и приповерхностные геологические процессы с максимальной эффективностью.

Список литературы:

1. Ампилов Ю.П., Владов М.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности: № 4 // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 42–65.
2. Калинин В.В., Кульницкий Л.М., Токарев М.Ю., Линейная одномерная корректирующая фильтрация для повышения разрешающей способности сейсмических данных // Вестник Московского Университета – 1992. – Сер. 4, Геология, № 3
3. Pirogova A., Zamotina Z., Shuplov P., Chegodaeva A., Tokarev M. Dynamic analysis of multifrequency 3D seismic datasets to identify potential geohazards in the Sea of Okhotsk // 83rd EAGE Annual Conference & Exhibition – 2022.
4. Rayleigh, F.R.S., Investigations in Optics, with special reference to Spectroscopy // Philosophical magazine and journal of science – 1879. – S. 5, – Vol. 8., No. 49. – P. 261 – 274.
5. Widess, M. B. How thin is a thin bed? // Geophysics. – 1973. – Vol. 38, № 6. – P. 1176–1180.

УДК 550.839

Рубрика 37.31.15

РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДОННЫХ ОСАДКОВ
КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

RESULTS OF ULTRASOUND STUDIES OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE
KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA

**Дернова Анна Сергеевна¹, Пирогова Анастасия Сергеевна², Ошкин Александр
Николаевич³**

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

² МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

³ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

**Dernova Anna Dergeevna¹, Pirogova Anastasiya Sergeevna², Oshkin Aleksandr
Nikolaevich³**

¹ MSU M. V. Lomonosov, Moscow

² MSU M. V. Lomonosov, Moscow

³ MSU M. V. Lomonosov, Moscow

Введение

Беломорская биологическая станция имени Н.А. Перцова (ББС) – один из учебно-научных центров Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, на базе которого ежегодно проводятся морские научные исследования и полевые практики студентов МГУ естественно-научных факультетов (биологического, геологического, физического и др.).

В данной работе представлена классификация проб, отобранных на полигоне ББС с 2018 года, их анализ, а также описаны методика и результаты ультразвуковых исследований на образцах донных отложений, полученных в ходе учебно-научной практики по морской геофизике летом 2023 года. Обозначены некоторые проблемы при проведении подобных измерений на газонасыщенных породах, а также предложены варианты их решения.

Целью данной работы было составление классификации ранее проведенных исследований и анализ результатов ультразвуковых исследований донных отложений. Для выполнения цели были поставлены следующие задачи:

- Сбор информации о проводимых ранее исследованиях;
- Составление общей базы данных, содержащей результаты анализа отобранных проб, их классификация по различным признакам;
- Обработка и анализ результатов ультразвуковых исследований проб 2023 года.

Обзор ранее отобранных проб

Начиная с 2018 года на полигоне в Кандалакшском заливе Белого моря было отобрано не менее 239 проб донных отложений вблизи ББС МГУ. Отбор проб проводился гравитационными трубами разной длины, от 2 до 4 метров, трубками ГОИН, ковшами и дночерпателями. Для выбора станций следующего пробоотбора была проведена классификация имеющихся отобранных проб по различным признакам, таким как: место отбора, результат (есть ли проба), наличие в пробе характерного запаха H_2S , текстур выхода газа, наилка, морских нефелоидных отложений голоцена, мощность отобранной пробы, количество вскрытых ею слоев.

На рисунке 1(а) приведена карта, на которой зеленым обозначены точки пробоотбора, содержащие породу, а красным – пустые. На рисунке 2(а) видно, что большее количество проанализированных проб, 75%, было отобрано на полигоне Плашкин, в проливе Великая Салма 16%, и самое малое, 8 %, указаны отобранными на "Белом море". Рисунок 2(б) иллюстрирует, что 27 %, от числа всех брошенных проб оказались пустыми: зачастую такие пробы содержат в себе водоросли, крупные камни, глыбы. Это может быть связано с тем, что дно в таких точках каменистое, а это, в свою очередь, говорит о том, что и планируемая гравитационная трубка в таких местах может вернуться пустой.

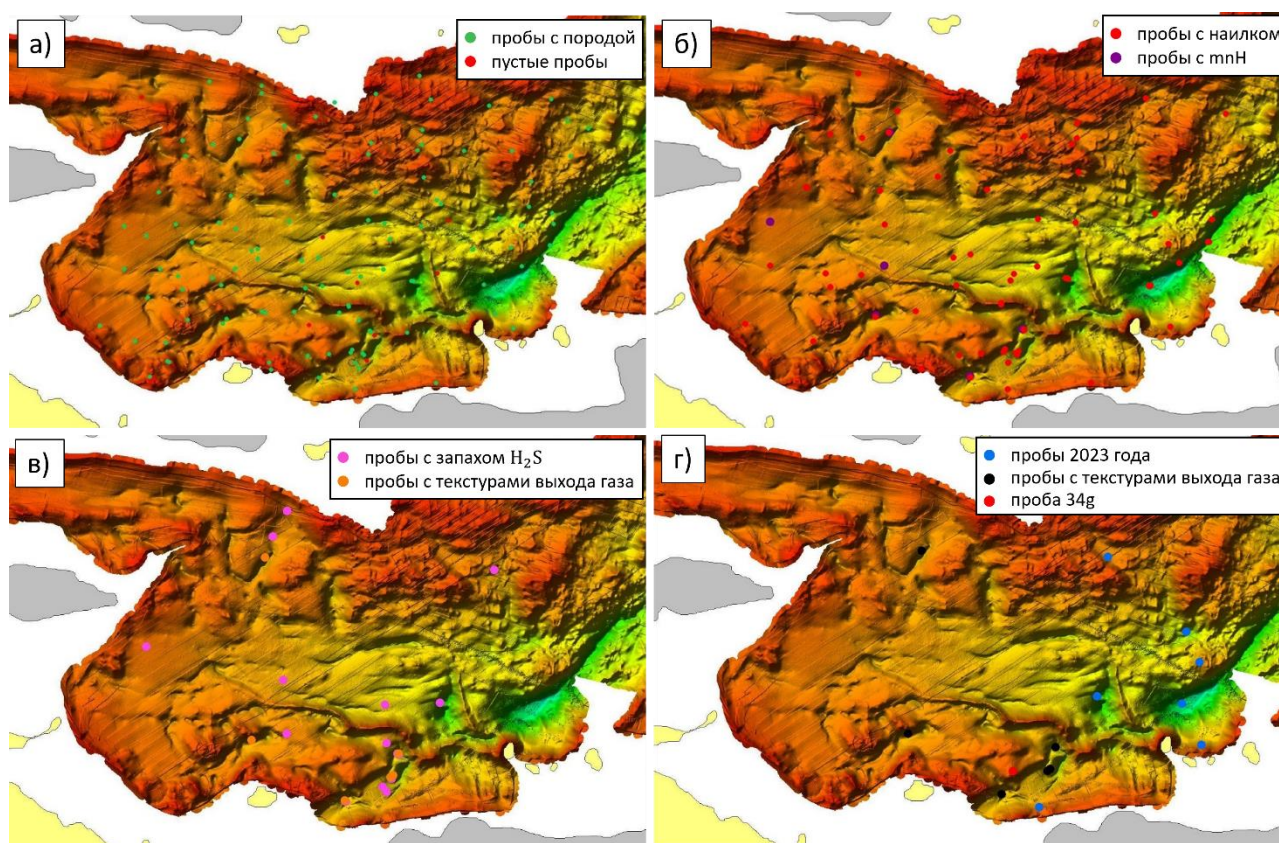


Рисунок 1. Схема станций донного пробоотбора, выполненного в акватории Кандалакшского залива вблизи ББС начиная с 2018 г. В качестве подложки используется цифровая модель рельефа дна. (а) Зеленым цветом показаны станции, в которых были отобраны отложения, красным – пустые станции; (б) Красным цветом показаны станции, вскрывшие наилку, фиолетовым – содержащие отложения MnH ; (в) Розовым цветом выделены станции с запахом сероводорода, оранжевым – содержащие текстуры выхода газа; (г) Синим выделены точки пробоотбора 2023 года, черным – содержащие текстуры выхода газа, красным выделена станция 34g.



Рисунок 2. (а) Диаграмма, отражающая соотношение проб, отобранных на разных участках вблизи ББС, (б) диаграмма, отражающая соотношение проб, вскрывших и не вскрывших разрез.



Рисунок 3. (а) Диаграмма, отражающая соотношение проб с наилком и без, (б) диаграмма соотношения проб, вскрывших морские нефелоидные отложения голоцена (mnH) и нет.

Анализ рисунков 3(а) и 3(б), наоборот, позволяет нам понять, в каких точках опробование с большей долей вероятности будет удачным. Наличие в пробах наилка и морских нефелоидных осадков говорит о том, что залегающие на дне породы достаточно рыхлые, чтобы гравитационная труба под собственным весом достаточно глубоко внедрилась в грунт. На рисунке 1(б) представлена карта, показывающая, в каких местах были отобраны пробы, содержащие морские нефелоидные отложения голоцена (mnH) или наилком.

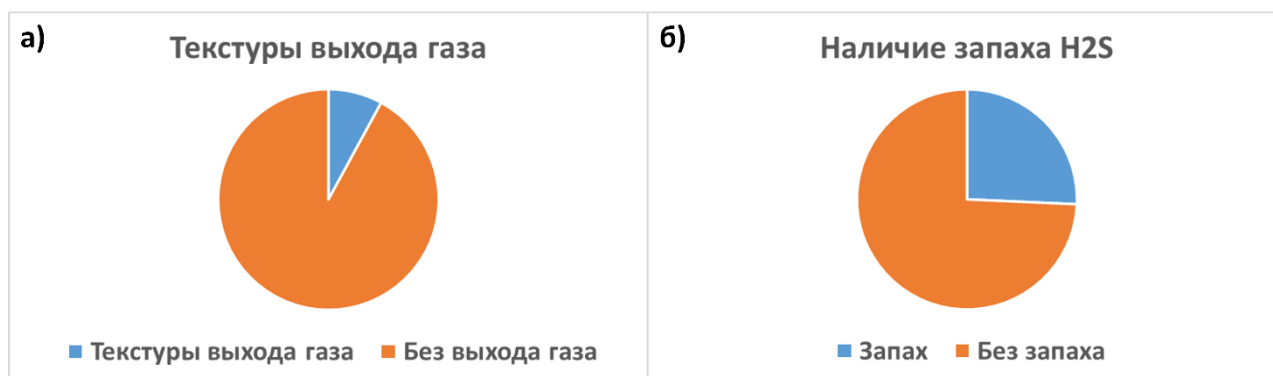


Рисунок 4. (а) Диаграмма, отражающая соотношение проб, содержащих текстуры выхода газа и без, (б) диаграмма соотношения проб, обладающих и не обладающих запахом H₂S.

На рисунках 4(а) и 4(б) можно заметить, что соотношение проб, содержащих газ, составляет от 10 до 26% процентов. Содержание газа в породе усложняет процесс измерений, снижает точность результатов (поскольку в таком случае зарегистрированный сигнал может пройти не ожидаемым кратчайшим путем, по породе, а по трубке, обладающей большей, нежели в газонасыщенном осадке, скоростью). Так как дальнейшая работа с трубками будет связана именно с проведением на них УЗИ, то количество таких проб следует минимизировать. На рисунке 1(в) приведена карта, где можно видеть, что расположение тех точек пробоотбора, в которых пробы содержат текстуры выхода газа, близко к тем, где в пробах есть запах сероводорода.

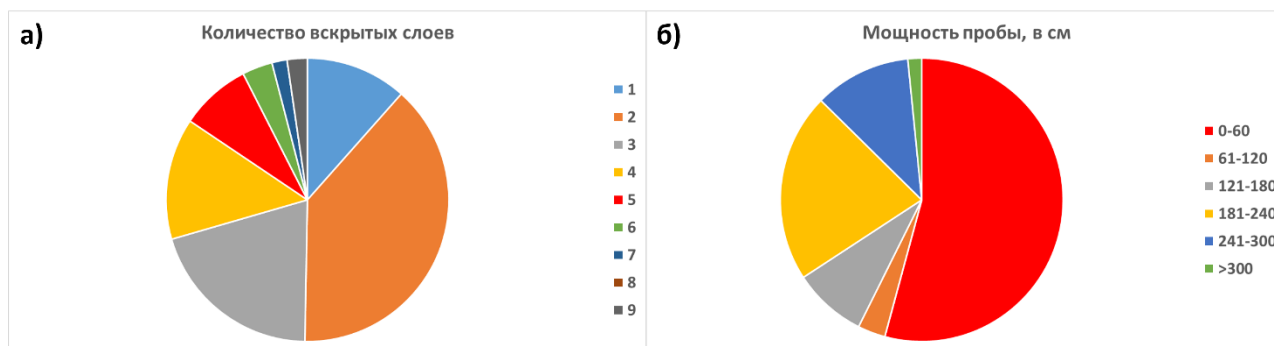


Рисунок 5. (а) Диаграмма, отражающая количество проб, вскрывающих то или иное количество слоев в пробе, (б) диаграмма, показывающая количество проб того или иного диапазона мощности.

На рисунке 5(а) показано, как часто вскрывается то или иное количество слоев в одной пробе. Можно заметить, что чаще всего проба состояла из двух слоев. Для целей текущего исследования требуются как монотипные пробы, то есть вскрывающие один тип породы, так и те, которые содержат в себе как можно больше различных типов. Также, для того, чтоб эффективнее использовать каждую отобранную пробу, будет лучше, если мощность породы в трубке будет больше (рис. 5(б)).

Методика исследований

В июле 2023 года на Белом море были отобраны трубки, на которых были проведены измерения скорости продольных волн ультразвуковым методом. Станции отмечены на карте (рис. 1(г)) синим цветом. Пробоотбор проводился с НИС «Профессор Зенкевич» с использованием гравитационной трубки длиной 3 метра и массой 190 кг (рис. 6), внутрь которой помещалась трубка-вкладыш диаметром 11 см. При помощи установленной на судне лебедки производился вынос трубки над водой, затем под собственной массой трубка падала, разгонялась, достигала дна и внедрялась в грунт, где заполнялась осадком. После чего с помощью лебедки трубку поднимали на поверхность, затягивали на борт, доставали вкладыш, заполненный породой, и заменяли на новый, пустой. Измерения полученных таким образом проб донных отложений проводились практически сразу после отбора трубок, в ультразвуковом диапазоне частот, с использованием двух пьезодатчиков 150 Гц (источника и приемника), генератора колебаний и осциллографа. Датчики, прикладываемые к трубке с двух сторон, передвигались по трубке по отметкам, проставленным через каждые 10 см. Датчик-источник подключался к генератору, датчик-приемник – к осциллографу, данные с которого отображались на компьютере с помощью программы АКТАКОМ Oscilloscope Pro.

Для каждой точки измерения таким образом было получено время первого вступления, которое пересчитывалось в скорость согласно следующей формуле:

$$V = \frac{d}{t_{пв} - \Delta t - t_{тр}},$$

где d – диаметр трубки (110 мм), $t_{пв}$ – время первого вступления, Δt – приборная погрешность, принимаемая равной 1 мкс, $t_{тр}$ – время пробега волны по самой трубке. Так как толщина стенки трубки составляла 1.5 мм, а скорость волны в ней – 2000 м/с, то величина $t_{тр}$ составила 1.5 мкс.



Рисунок 6. Гравитационная трубка на лебедке

Анализ результатов УЗИ 2023 года

Полученные результаты представлены на рисунке 7. Всего было отобрано 8 трубок, из которых 6 (отображены на графике) имели длину более полуметра. В среднем, мощность отобранных проб составила 1.7 метра. На графике можно видеть, что скорость продольной волны по породе во всех трубках примерно одинакова и составляет в среднем 1540 м/с. Однако в трубке 34g (желтым) скорость в среднем ниже, около 1490 м/с. Также было замечено, что на отметке, соответствующей глубине 1400 метров, скорость продольной волны в этой трубке снижается почти в два раза, что, вероятно, связано с наличием газа в породе. На рисунке 1(г) видно, что станция 34g (выделена красным) располагается в том же районе, где и трубки, содержащие

текстуры выхода газа (выделены черным), что согласуется с наблюдением о пониженной скорости. В целях эксперимента было проведено измерение скорости не через трубку-вкладыш, а непосредственно на породе (рисунок 8). Был сделан вывод, что для слагающих эту трубку газонасыщенных пород база просвечивания, равная диаметру трубки 11 см, слишком велика, поскольку сигнал при прохождении через газонасыщенную породу затухает раньше, чем достигает приемника. На рисунке 8 видно, что в случаях 1 и 2 осадок менее консолидирован, чем в случае 3. При этом на рисунке 9 можно видеть, как в первом и во втором случаях из-за того, что осадок слабо консолидирован, для чтобы получить сигнал на приемнике, база прозвучивания была уменьшена до 1-2 см. В этих двух случаях был зарегистрирован только низкочастотный сигнал. Спектр, выделенный зеленым, соответствует сигналу 1 и не содержит высокочастотной компоненты. В третьем же случае осадок консолидирован сильнее, поэтому даже при базе, равной 10 см, был зарегистрирован высокочастотный сигнал (рис 9(а) случай 3, рис. 9(б) – бежевым). Таким образом, можно сделать вывод, что при имеющейся методике выполнения УЗ-исследований на трубках-вкладышах невозможно получить достоверные значения скорости продольных волн в газонасыщенных породах, поскольку сигнал затухает и не доходит до приемника. В качестве решения данной проблемы можно проводить исследования на меньшей базе прозвучивания.

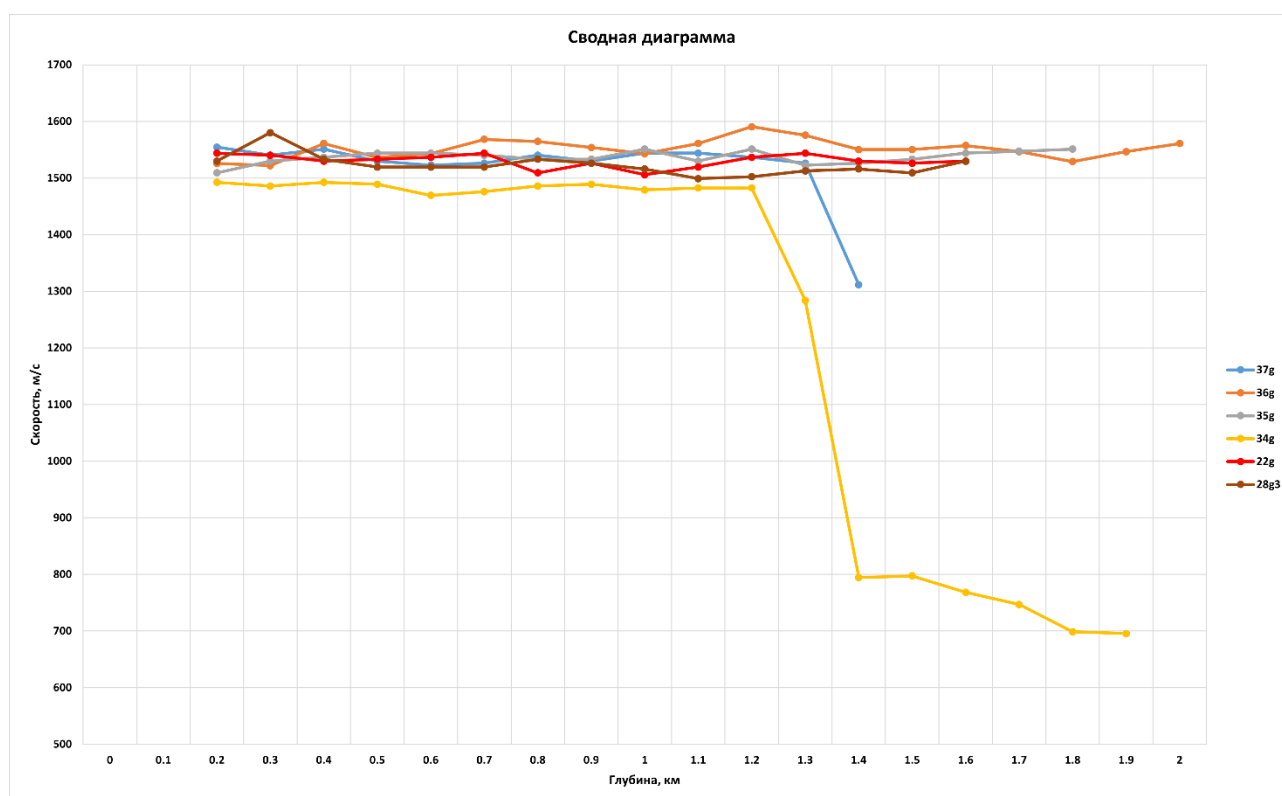


Рисунок 7. График, показывающий результаты УЗ-исследований.



Рисунок 8. Фотографии процесса измерений.

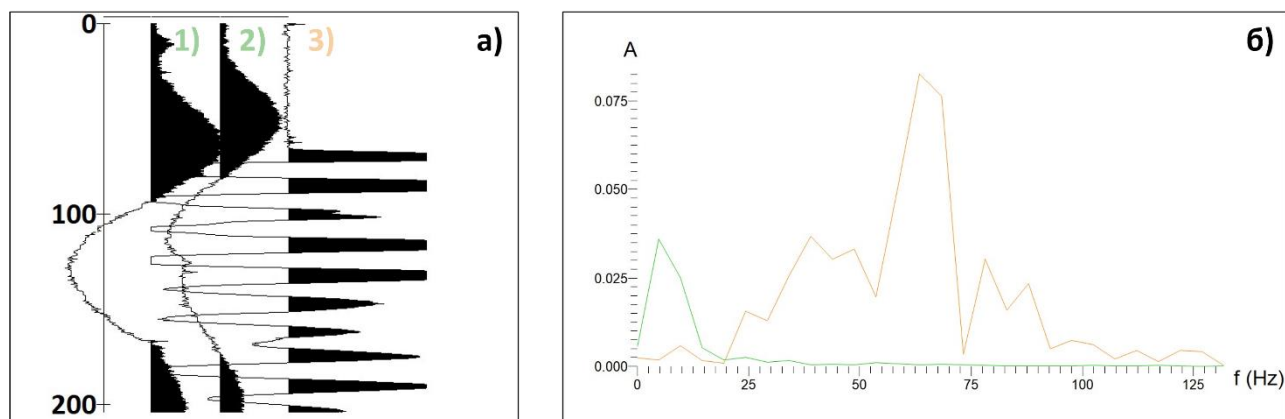


Рисунок 9. (а) Сигналы, полученные приемником в случае 1,2 и 3, (б) спектры случаев 1 и 3.

Выводы

На основании проделанной работы можно сделать несколько выводов:

- В донных отложениях, залегающих не глубже 1.7 метра, средняя скорость продольных волн, оцененная по результатам ультразвуковых исследований, проводимых с использованием пьезодатчиков с рабочей частотой 150 Гц, принимает значения в диапазоне 1490-1540 м/с;
- Описанная методика УЗ-исследований не позволяет проводить измерения на газонасыщенных образцах донных отложений. Наличие газа в породе приводит к

затуханию сигнала, и база прозвучивания, равная диаметру трубки-вкладыша, становится слишком большой.

Следует отметить, что возможным вариантом решения такой проблемы может стать уменьшение базы прозвучивания и изменение методики проведения УЗ-исследований.

На основании проведенной классификации ранее отобранных проб донных отложений можно сделать вывод о том, в каких местах стоит выполнять пробоотбор для проведения последующих интересующих исследований. Анализ результатов ультразвуковых измерений также позволяет внести коррективы в план будущих исследований, в рамках которых планируется отбор донных отложений с отличающимся составом и происхождением.

УДК 550.3

Рубрика 37.01.77

РЕЗУЛЬТАТЫ МУЛЬТИЧАСТОТНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕВЕРО-КАРСКОЙ АКВАТОРИИ
RESULTS OF MULTIFREQUENCY PROCESSING OF SEISMIC RESEARCH'S FROM
NORTH-KARA SEA DATA

Трубко Сергей Сергеевич¹, Терёхина Яна Евгеньевна²

¹ *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Москва*

² *ООО "ЦАСД", Москва*

Trubko Sergey Sergeevich¹, Terehina Yana Evgenievna²

¹ *Moscow state university (MSU), Moscow*

² *ООО "CASD", Moscow*

Введение

На сегодняшний день сейсморазведка является основным методом геофизического комплекса исследований. В частности, метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) является одним из самых эффективных при изучении геологического строения акваторий Северного Ледовитого океана. В последние годы стали популярными методы широкополосной сейсморазведки, которые позволяют значительно повысить вертикальное разрешение.

Один из вариантов широкополосной технологии состоит в объединении нескольких сейсмических записей, что позволяет дополнить спектр низкими и высокими частотами. Это можно осуществить, например, используя две пары источник-приемник с разными заглублениями, что и было сделано в рейсе TTR-21 на шельфе Карского моря. Таким образом, мы получим шанс после соответствующей специальной обработки получить мультиспектральную запись с высоким разрешением.

Целью данной работы является оценка возможности обработки мультиспектральных данных сейсморазведки высокого и сверхвысокого разрешения (СВР и ССВР соответственно) на основе результатов исследований Северо-Карской акватории в рамках рейса TTR-21.

Результаты

Данные были обработаны по классическому графу ОГТ, а после были согласованы по донному отражению и с помощью весовых коэффициентов было подобрано соотношение среднеквадратических амплитуд СВР и ССВР (Рисунок 1).

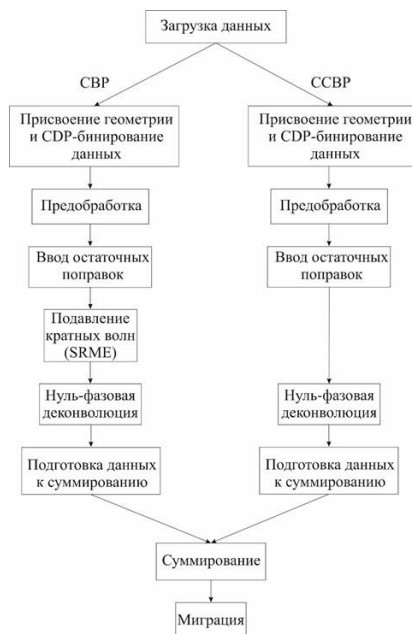


Рисунок 1. Граф обработки данных СВР и CSVР.

Результаты мультимастотной обработки данных приведены ниже (Рисунок 2, Рисунок 3). При сложении данных наблюдается расширение спектра сигнала, уменьшение влияния волн-спутников за счет частотного перекрытия сейсмозаписей с разными центральными частотами, увеличение вертикальной разрешающей способности на малых временах. Так же хорошо видно, как вносят свой вклад низкочастотные данные после суммирования: становятся видны отражающие горизонты на больших временах. Благодаря сложению датасетов можно проводить структурную интерпретацию не нескольких разрезов отдельно, а их суммированный разрез.

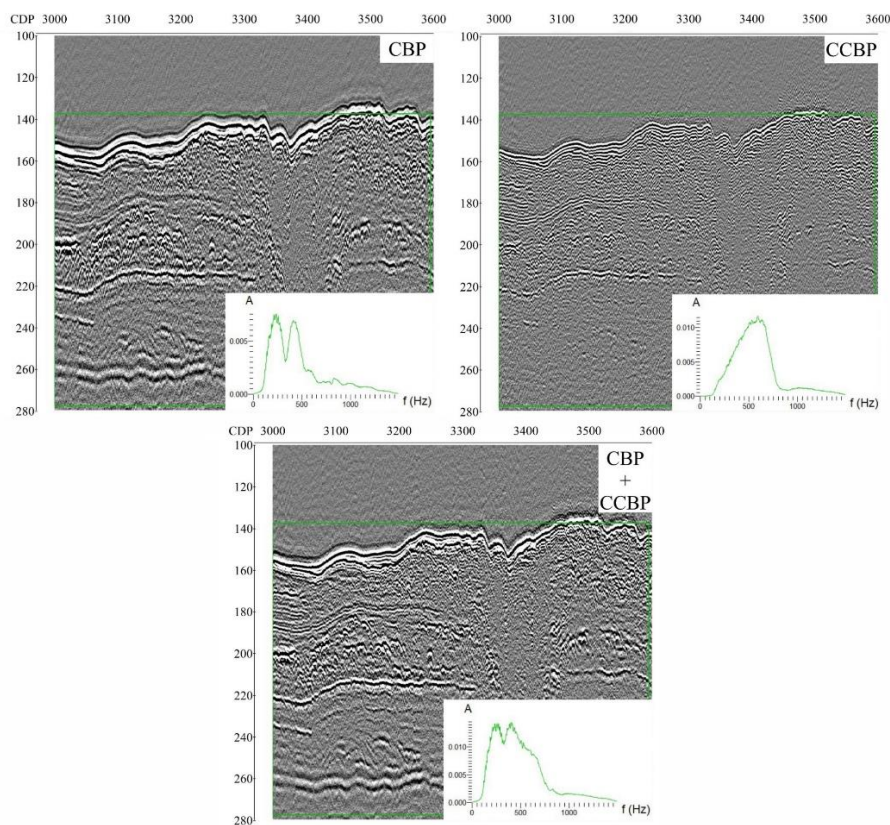


Рисунок 2. Временные разрезы данных СВР, ССВР и их суммы, а также спектры, выделенных областей.

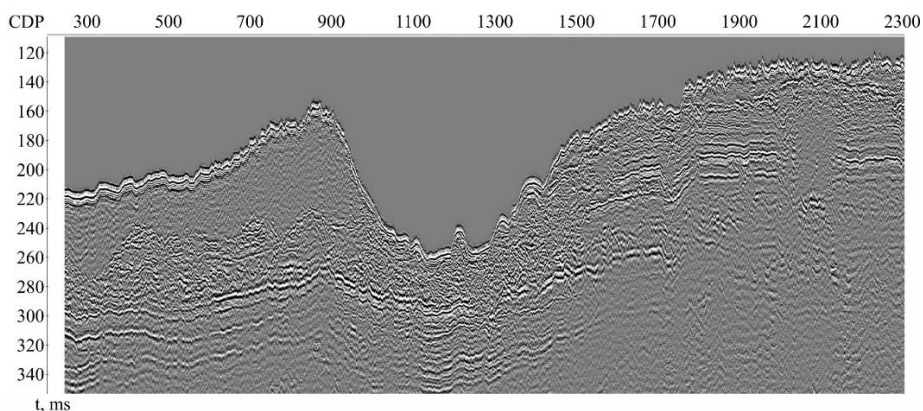


Рисунок 3. Фрагмент итогового мультичастотного временного разреза

После обработки была проведена первичная интерпретация полученных мультичастотных временных разрезов.

На одном из профилей выделены 4 сейсмокомплекса (Рисунок 4). 1-й сейсмокомплекс (кровля – кривая *Вот* (дно), подошва – кривая *А*) состоит из двух сейсмических фаций: 1-я фация имеет по большей части хаотическую волновую картину с газонасыщенными осадками (отмечены как *Gas* на рисунках) и не ровным рельефом дна; 2-я фация имеет слоистую волновую картину и относительно плавный рельеф дна. 2-й сейсмокомплекс (кровля – кривая *А*, подошва – кривая *В*) практически полностью представлен акустически прозрачной волновой картиной. 3-й сейсмокомплекс (кровля – кривая *В*, подошва – кривая *С*) имеет бугристую волновую картину и местами хаотическую. 4-й сейсмокомплекс (кровля *С*) представлен хаотическим

типом записи, но также встречаются и складчатые формы с относительно крутыми углами падения крыла (кривые D).

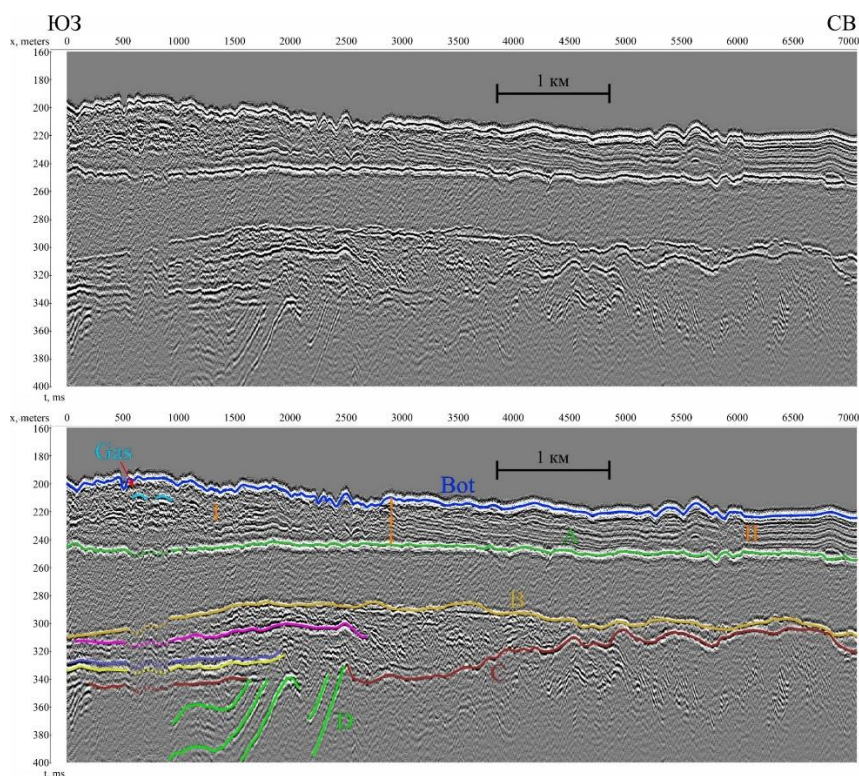


Рисунок 4. Временные разрезы, наверху исходный разрез, снизу – проинтерпретированный

Выводы

Таким образом, составленный граф обработки данных СВР и ССВР успешно решает поставленные мультисоставные задачи на Северо-Карской акватории и рекомендуется к использованию для глубоководных зон шельфа. Для мелководных акваторий необходимы дополнительные процедуры обработки.

Благодаря мультисоставной обработке удалось получить расширение спектра за счет сложения данных СВР и ССВР, что позволило снизить влияние волн спутников на итоговый разрез и увеличить вертикальную разрешающую способность в верхней части разреза.

По полученным данным была проведена первичная интерпретация, по итогу которой были выделены основные сейсмокомплексы, а также особенности геологического разреза, включая придонные газонасыщенные отложения.

Список литературы:

1. Ампилов Ю.П., Владов В.Л., Токарев М.Ю. Технологии морской сейсморазведки в широком частотном диапазоне: проблемы и возможности Опубликовано в журнале "Сейсмические приборы", 2018, т. 54, №4, с.42-65. 10.21455/si2018.4-4.
2. Васильев В. В., Вискунова К. Г., Кийко О. А., Козлов С. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист Т-41-44 – мыс Желания. Объяснительная записка. Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург, 2013 г. – 200 с.

3. Дараган-Суцова Л.А., Петров Е.О., Дараган-Суцов Ю.И. К вопросу о возрасте фундамента Баренцево-Карского региона // Региональная геология и металлогения, 2013. № 55. С. 21-27. 23.
4. Конторович В.А., Конторович А.Э. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности шельфа Карского моря. Доклады Академии Наук, 2019, том 489, №3, с.272-276
5. Малышев Н.А., Никишин В.А., Никишин А.М., Обметко В.В., Мартиросян В.Н., Клещина Л.Н., Рейдик Ю.В. Новая модель геологического строения и истории формирования СевероКарского осадочного бассейна // ДАН, 2012в. Т. 445. №1. С. 791-795
6. Старцева К.Ф. Этапы формирования Восточно-Баренцевского и Северо-Карского бассейнов на основе сейсмостратиграфического анализа. Канд.дисс., Москва, МГУ, 2018
7. Cahyaningtyas M. B. and Bahar A. Broadband Seismic: Case Study Modeling and Data PProcessing. Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 132 012001 (2018).
8. Dondurur D. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier, Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, Netherlands (2018)
9. Greer S., Fomel S. Matching and Merging High-Resolution and Legacy Seismic Images //Geophysics. – Т. 83. – №. 2. – С. V115-V122 (2018)
10. Hampton L. Physics of Sound in Marine Sediments. Marine Science, Springer New York, NY, ISBN: 978-1-4684-0838-6 (1974)
11. Hatton L., Worthington M. H., Makin J. Seismic Data Processing: Theory and Practice. Blackwell Scientific Publications. ISBN: 5-03-000926-4 (1986)
12. Kluesner J. Brothers D. Hart P. Miller N. Hatcher G. Practical Approaches to Maximizing the Resolution of Sparker Seismic Reflection Data. Mar Geophys Res 40, 279–301 (2019).
13. Labaune C., Tesson M. & Gensous B. Integration of High and Very High-resolution Seismic Reflection Profiles to Study Upper Quaternary Deposits of a Coastal Area in the Western Gulf of Lions, SW France. Mar Geophys Res 26, 109–122 (2005).
14. Nørmark E. et all. Simultaneous Acquisition of Airgun Seismic and High Resolution Sparker Data—Combining the Two Types of Data // Near Surface Geoscience, 20th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2014. № 1. PP. 1 – 5.
15. Ravasi, M., and I. Vasconcelos, 2020, PyLops—A linear-operator Python library for scalable algebra and optimization. SoftwareX, 11, 100361. doi: 10.1016/j.softx.2019.100361
16. Ricker, Ormsby, Klander, Butterworth. A Choice of Wavelets. RECORDER Vol. 19, Issue No. 07 (1994).
17. Verschuur D. J. Seismic Multiple Removal Techniques: Past, Present and Future. EAGE, ISBN: 9073834562 (2013)
18. Wang X., Qi B., Zhao Q. et al. Feasibility of Sparker Source in Marine Seismic Exploration: Data Analysis and Processing. Acta Geophys. 67, 1413–1418 (2019).
19. Xiaofeng Dai, Lideng Gan, Hao Yang, Identifying and predicting multiples based on spread of velocity spectrum, Journal of Geophysics and Engineering, Volume 17, Issue 1, February 2020, Pages 89–96
20. Yang Z., Wang X., Hao X. et al. Research on Combined Crocessing Techniques of Air Gun and Sparker Dource Towed Streamer Seismic Data. Mar Geophys Res 43, 18 (2022).

УДК 550.8.054

Рубрика 37.01.00

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ МУЛЬТИЧАСТОТНЫХ
СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ НИЛЬМИНСКО-ЧЕРНОРЕЧЕНСКОЙ
ПРИУСТЬЕВОЙ МЕСТНОСТИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ

METHODOLOGY FOR PROCESSING DATA OF MULTI-FREQUENCY
SEISMOACOUSTIC OBSERVATION IN THE NILMINSKO-CHERNORECHENSKAYA
ESTUARY AREA OF THE KANDALAKSHA BAY OF THE WHITE SEA

Дедова Татьяна Алексеевна¹, Белов Михаил Владимирович²

¹ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва*

Dedova Tatiana Alekseevna¹, Belov Mikhail Vladimirovich²

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

² *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Введение

Одним из главных показателей качества получаемых в полевых условиях сейсмических данных является ширина амплитудного спектра зарегистрированного сигнала. Для решения проблемы расширения спектра было придумано множество способов, например, использование наклонных регистрирующих систем или применение деконволюции на стадии обработки. Однако у этих методов есть существенные недостатки: буксирование наклонной косы технически довольно трудно реализовать; в случае деконволюции расширение спектра сигнала за счет его преобразования к виду дельта-функции неминуемо влечет за собой увеличение уровня шума.

Проведение полевых мультимчастотных исследований - доступный и эффективный инструмент для изучения верхней части разреза на акваториях на качественно новом уровне [Потемка А.К., 2023]. Основная идея метода заключается в поочередном возбуждении сигналов различной центральной частоты и их регистрации одной-двумя и более приемными системами. Таким образом удается получить сразу несколько различных наборов данных, суммирование которых позволяет достичь расширения спектра регистрируемого отклика среды.

В 2023 году в акватории Нильминско-Чернореченской приустьевой местности Кандалакшского залива в рамках Беломорской геофизической практики были произведены мультимчастотные наблюдения двухуровневыми системами регистрации.

Расстановка выглядела следующим образом (рис.1): использовались две 16-канальные сейсмические косы. Одну косу вслед за судном буксировали у поверхности, вторую погружали на некоторую глубину. В качестве источников возбуждения использовались спаркеры, работающие в режиме flip-flop и поочередно генерирующие импульсы с секундным интервалом излучения и с задержкой 400 мс их относительного срабатывания на центральных частотах примерно 250 и 350 Гц. Таким образом, потенциально могло быть получено 4 набора данных: 2 – по данным записи приповерхностной системы и 2 – по

данным заглубленной. В работе будет представлен пример обработки сигнала, зарегистрированного приповерхностной системой наблюдения.

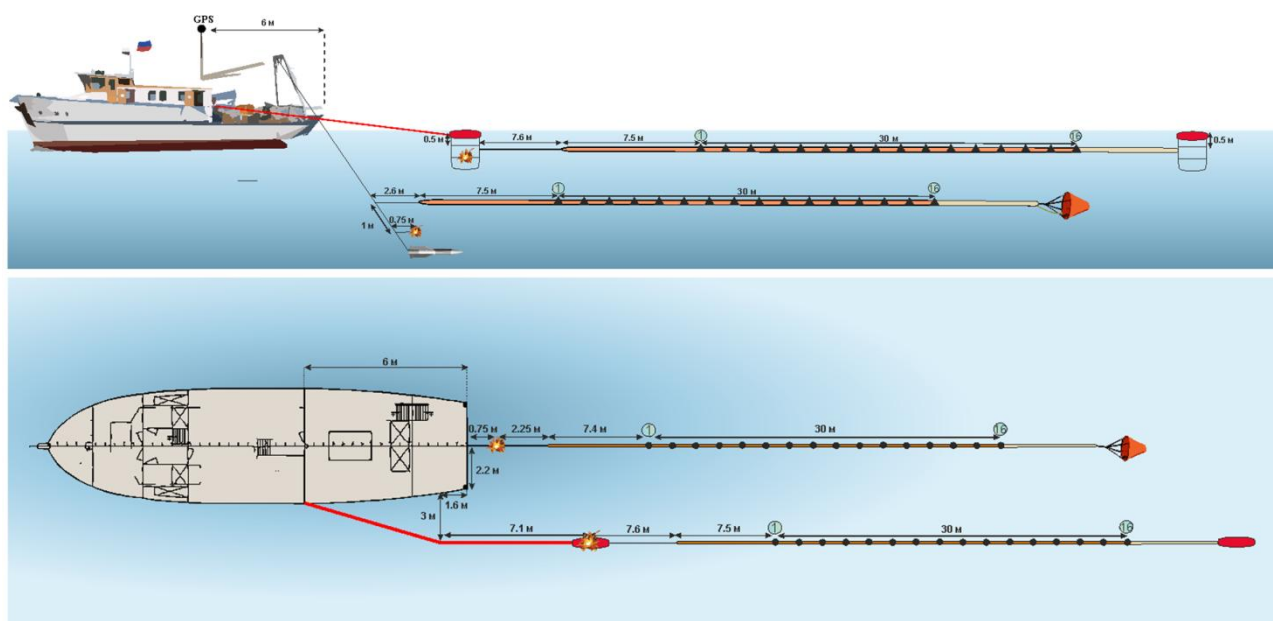


Рис.1. Схема расстановки при работах по методике мультимодальных сейсмоакустических наблюдений в Нильминско-Чернореченской приустьевой местности Кандалакшского залива.

Результаты обработки

В результате тестов был разработан граф обработки мультимодальных данных, полученных по методике приповерхностной косы (рис.2), оптимальный с точки зрения баланса трудоемкости и качества получаемого результата. Из его особенностей следует отметить, что в виду мультимодального характера съемки работа ведется параллельно с двумя наборами данных. Также разработанный граф предусматривает применение значительно меньшего числа процедур по сравнению со стандартным графом обработки данных сейсморазведки по методике приповерхностной косы, поскольку использование некоторых из них было бы нецелесообразным. В частности, на данных не наблюдалось высокоамплитудных выбросов, требующих обязательной реализации TFD-фильтра. Также не осуществлялось подавление кратных волн, поскольку их поле разнесено с полезным сигналом и не препятствует работе с целевыми геологическими интервалами.

Этап предобработки включал в себя полосовую фильтрацию сейсмограмм для подавления низкочастотного шума от волнения моря с помощью модуля Bandpass Filtering. Амплитудный спектр показал, что его значения сосредоточены на отметках примерно до 100 Гц. Эта процедура была применена к обоим датасетам – низкочастотному и высокочастотному. Далее была введена поправка за сферическое расхождение фронта волны посредством модуля Amplitude Correction. В целом, с имеющимся на сейсмограммах набором шумов данных процедур оказалось достаточно на этапе предобработки.

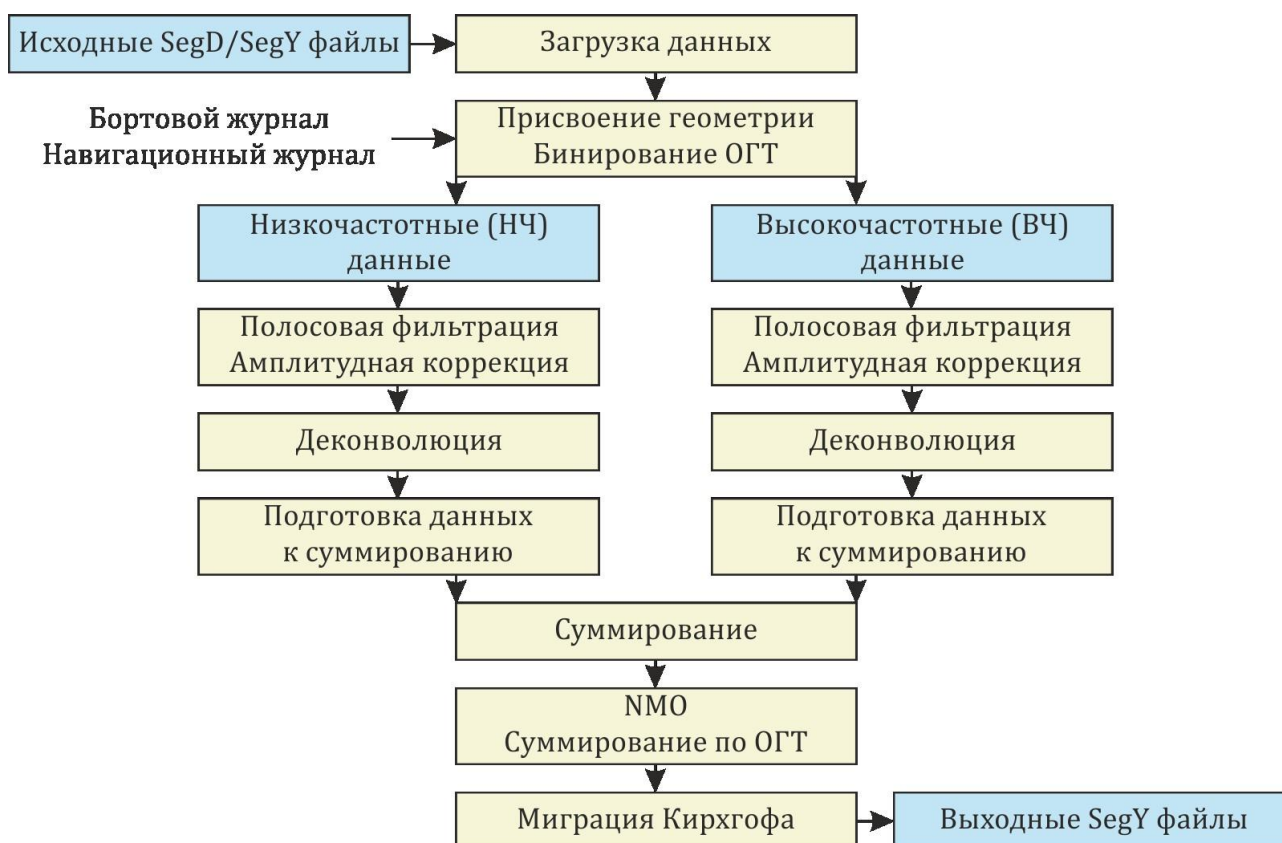


Рис.2. Граф обработки данных мультисекционной сейсморазведки по методике приповерхностной косы.

На следующем этапе осуществлялась нуль-фазовая деконволюция (рис.3, рис.4). Процедура приводит фазовые спектры сигналов к нулевому виду и не изменяет амплитудные спектры. В результате импульс произвольной формы принимает симметричную форму, а отражения от одинаковых границ на разных датасетах оказываются приведены к одному времени. Нуль-фазовая деконволюция – это один из этапов подготовки данных к суммированию.

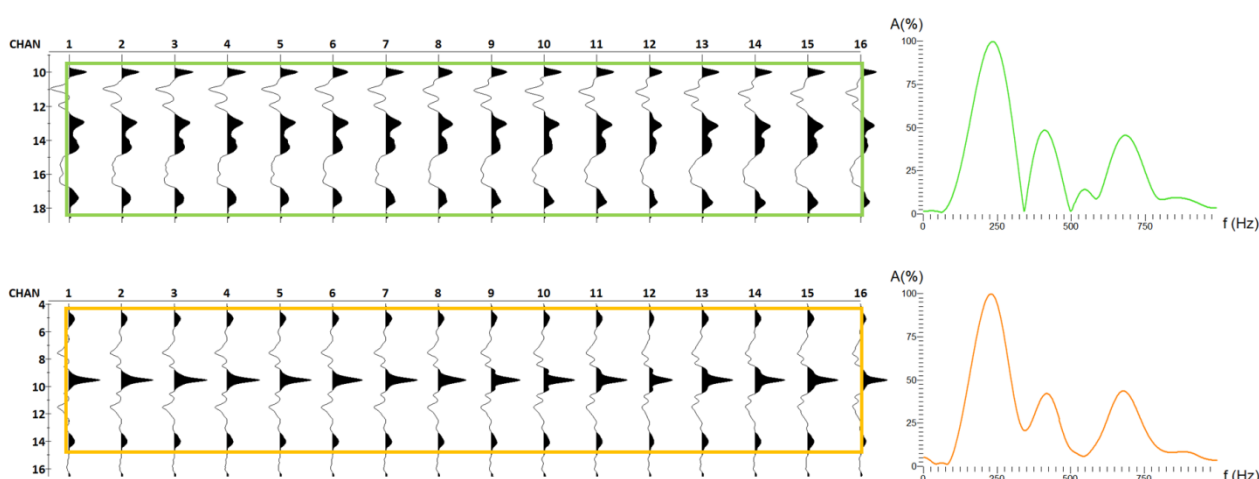


Рис.3. Результат поканального применения нуль-фазовой деконволюции к низкочастотному набору данных.

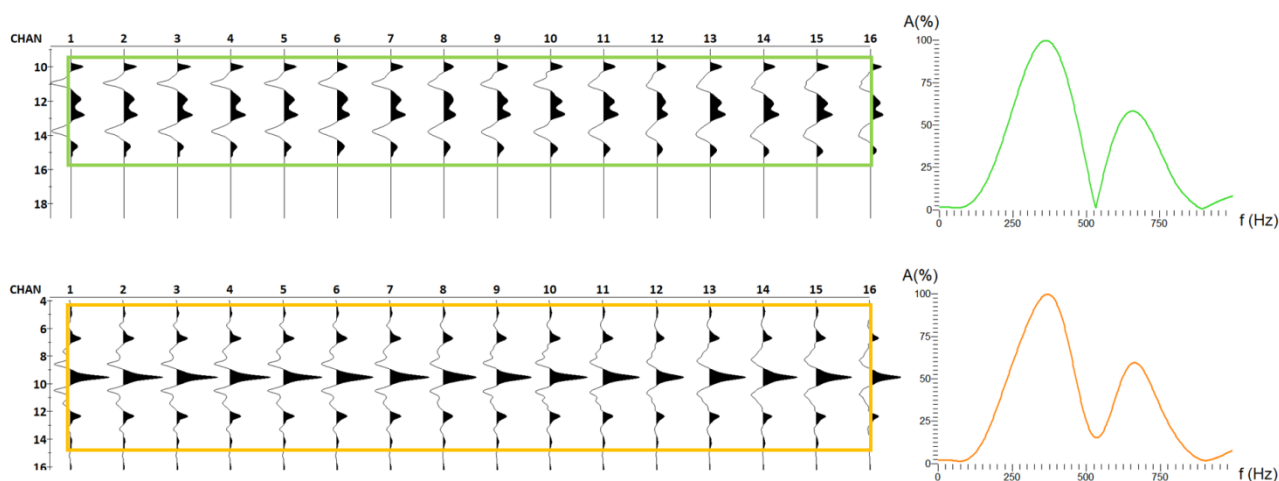


Рис.4. Результат поканального применения нуль-фазовой деконволюции к высокочастотному набору данных.

Завершающий этап подготовки данных к суммированию – это нормализация амплитуд. С помощью модуля SSAA в заданных окнах для наборов данных рассчитываются среднеквадратичные RMS-амплитуды. Далее производится нормирование всех амплитуд на один уровень по формуле 1:

$$RMS = \frac{RMS_{HЧ}}{RMS_{ВЧ}}$$

где RMS – новая RMS-амплитуда, $RMS_{ВЧ}$ – исходная RMS-амплитуда (ВЧ набор), $RMS_{НЧ}$ – исходная RMS-амплитуда (НЧ набор), k – весовой коэффициент.

Высокочастотные данные нормировались на уровень низкочастотных. Коэффициент суммирования k определяет вклад того или иного набора в результат суммирования. Для данных по Нильминско-Чернореченской местности были протестированы значения от 0.5 до 2 с шагом 0.5. Оптимальное значение коэффициента суммирования выбирается на основании визуализации фрагментов временных разрезов, полученных в результате объединения разночастотных наборов (рис.5), и их амплитудных спектров (рис.6). Наибольшая ширина спектра достигается при значении $k = 1.5$. Именно оно было применено к данным при окончательном суммировании.

Оценка результата суммирования производится с помощью визуализации амплитудных спектров сигнатур (рис.7) и фрагментов временных разрезов нулевых удалений (рис.8) исходных и обработанных данных. Объединение датасетов различной центральной частоты позволило добиться расширения спектра полезного сигнала.

Финальным этапом обработки является применение FK-миграции Столта, которая позволила избавиться на итоговом изображении от петель и изменила углы наклона границ синформ.

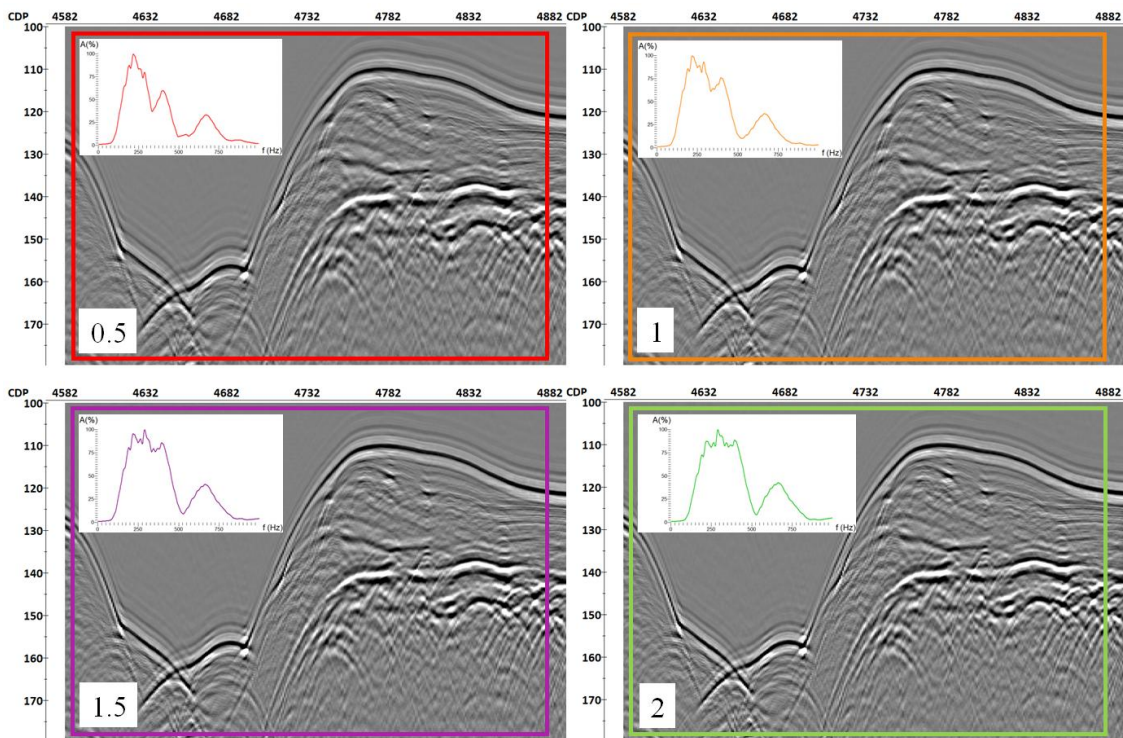


Рис.5. Фрагменты суммированных временных разрезов с разными значениями коэффициента суммирования и соответствующие им амплитудные спектры.

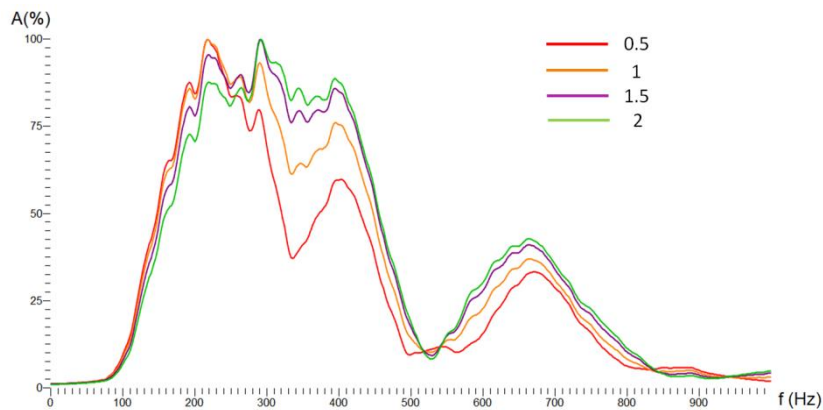


Рис.6. Амплитудные спектры суммированных данных с разными значениями k.

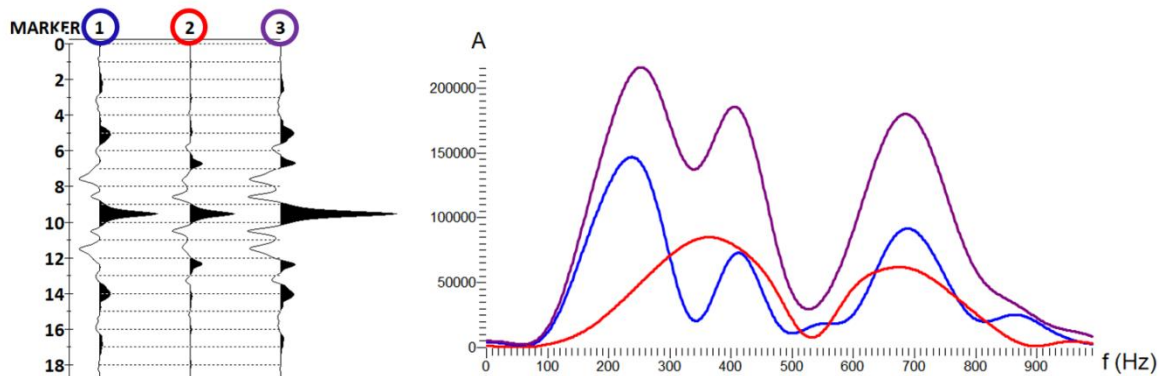


Рис.7. Нуль-фазовый вид сигнатуры исходных наборов данных и результата суммирования и соответствующие им амплитудные спектры: 1 – низкочастотные данные, 2 – высокочастотные данные, 3 – результат суммирования.

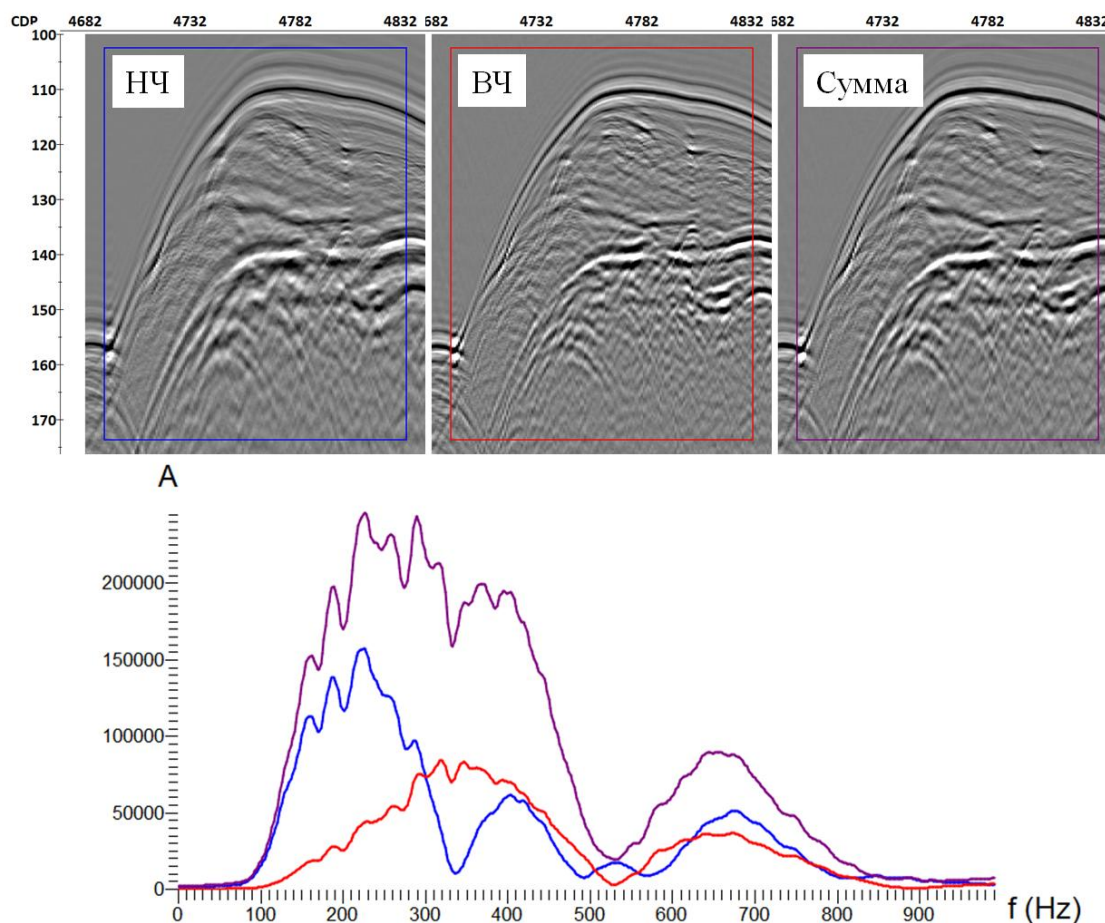


Рис.8. Фрагменты временных разрезов нулевых удалений исходных наборов данных и результата суммирования и соответствующие им амплитудные спектры.

Выводы

Мультисоставные сейсмические исследования – это современный и эффективный способ получения высокоразрешающих сейсмических данных.

Преимущество суммированных данных над низкочастотными выражается в повышении вертикальной разрешающей способности, что позволяет отслеживать границы, ранее не доступные взгляду. По отношению к исходным высокочастотным данным суммированный разрез нагляднее демонстрирует более глубокие границы, где высокие частоты уже претерпевают значительное рассеяние.

Сформированный граф обработки данных мультисоставных сейсмоакустических исследований Нильминско-Чернореченской приустьевой местности Кандалакшского залива Белого моря успешно реализуется на практике.

Список литературы

1. Потемка А.К., Токарев М.Ю., Буланова И.А., Кудинов А.А., Яковенко А.Д., Бабушкина К.В. Эффективность мультисоставных сейсмоакустических наблюдений для изучения разреза четвертичных отложений в северной части Карского моря // Геофизика. – 2023. – № 2. – С. 2-9.

УДК 550.8.052

Рубрика 37.29.35

АНАЛИЗ КОМПЛЕКСА ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В КАРСКОМ МОРЕ НА
ТЕРРАСЕ ГЕРКУЛЕСА ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ
ANALYSIS OF QUATERNARY SEDIMENT COMPLEX IN THE KARA SEA ON THE
HERCULES TERRACE BASED ON ACOUSTIC PROFILING DATA

Бабушкина Ксения Владимировна¹, Старовойтов Анатолий Васильевич¹

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

Babushkina Ksenia Vladimirovna¹, Starovoytov Anatoly Vasilyevich¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow*

Введение

В представленной работе проводится анализ данных акустического профилирования, полученных летом 2022-го года при проведении комплексных геолого-геофизических исследований верхней части разреза Северо-Карского шельфа в рамках экспедиции TTR-21 («Обучение через исследования»). Акустическое профилирование проводилось с использованием параметрического профилографа «Parasound P70» с рабочей частотой 7 кГц.

Для рассмотрения были выбраны данные с участка «Врез» площадью 7x10 км, расположенного в пределах террасы Геркулеса. Рассматриваемая область находится в непосредственной близости с предполагаемой границей максимума распространения последнего оледенения, которая проходит на СЗ от изучаемой территории (Hughes et al. 2016). Участок интересен наличием геоморфологических и структурных особенностей спорного генезиса.

Геоморфологические особенности

По данным в Государственной геологической карты (лист Т-41-44) (Васильев и др, 2013) участок исследований относится к территории развития эрозионных и эрозионно-денудационных склонов позднеплейстоценового возраста, сформированных в субэзральных и субаквальных условиях. Основная особенность участка - наличие отрицательной серповидной формы рельефа наподобие вреза, которая имеет размеры 7x1.5 км и вытянута с севера на юг (Рисунок 1). В мелководных участках за пределами вреза на севере, востоке и юге имеются хаотически ориентированные борозды айсбергового выпахивания. В южной части также наблюдаются многочисленные покмарки диаметром около 10-25 м и глубиной около 1 м. На дне самого вреза наблюдаются вытянутые в северном направлении холмы и гряды шириной от 100 до 300 м и высотой 5-10 м над дном.

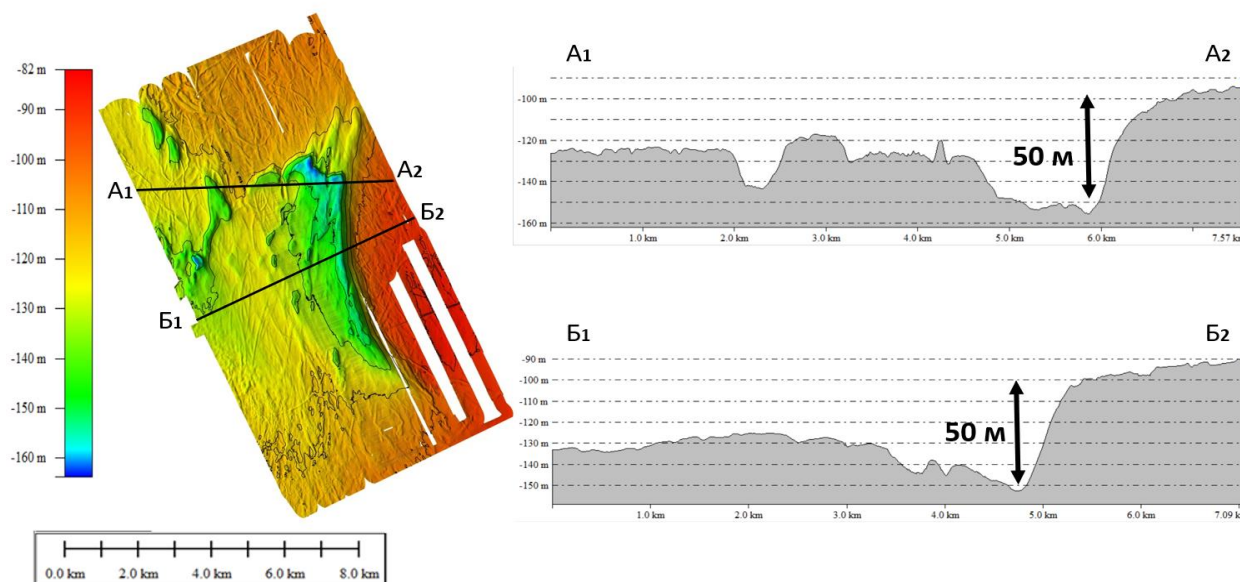


Рисунок 1. Участок исследований "Врез". Слева: результаты батиметрической съёмки на участке, справа: профили глубин через линии А1-А2 и Б1-Б2

Сейсмостратиграфические особенности разреза

На данных акустического профилирования хорошо прослеживается строение двух верхних комплексов разреза четвертичных отложений: СК1 и СК2 (Рисунок 2). Верхний горизонтально-слоистый комплекс СК1 достигает на участке мощности 20 м и по данным геологического пробоотбора сложен голоценовыми морскими осадками. Наибольший интерес представляет нижний слоистый комплекс, имеющий сложное строение: в нём можно выделить верхний подкомплекс СК2-2 с изменчивым характером слоистости, местами с хаотической волновой картиной, отложения которого встречаются фрагментарно или в виде линз; в нижней части разреза выделяется горизонтально-слоистый подкомплекс СК2-1.

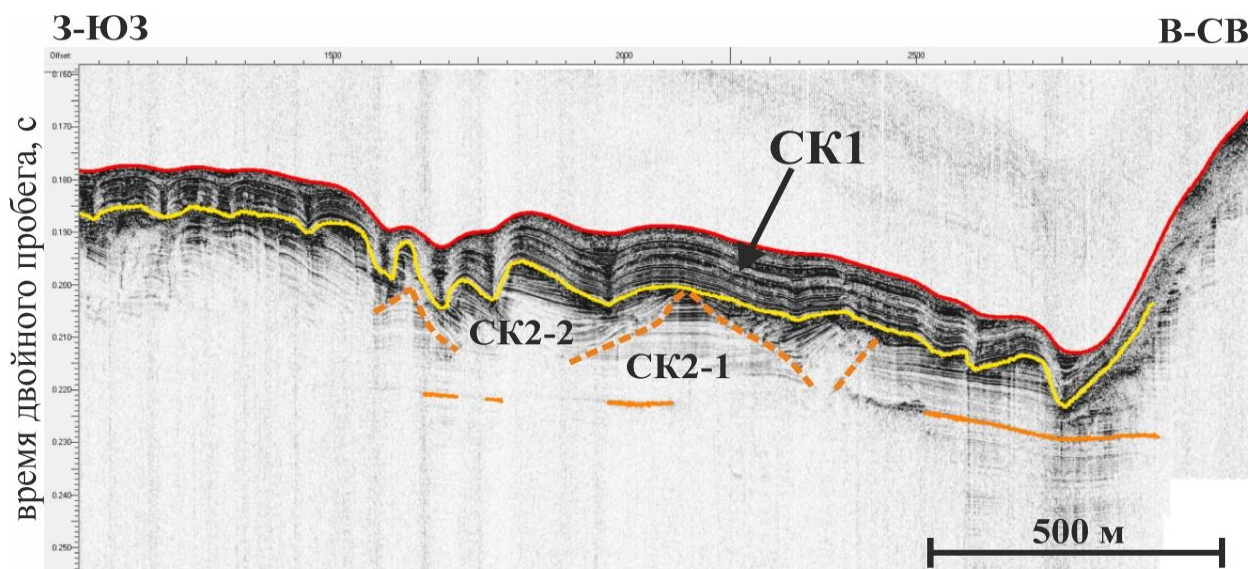


Рисунок 2. Профиль АПр с интерпретацией: красный горизонт - отражение от дна, жёлтый - подошва комплекса СК1 (голоценовые морские осадки), оранжевый пунктир - подошва косослоистого подкомплекса СК2-2, оранжевый горизонт - подошва комплекса СК2

Отложения комплекса СК2 также выражаются в рельефе, формируя валы и гряды в восточной части участка на дне вреза. Вблизи восточного склона в рельефе дна выражена протяжённая с ССВ на ЮЮЗ гряда, в строении которой на сейсмограммах АПр выделяются косослоистые отложения с выдержанным углом наклона слоёв (Рисунок 3). Были определены элементы залегания слоистости в одном пересечении профилей: слои падают в СЗ направлении под углом около 5°.

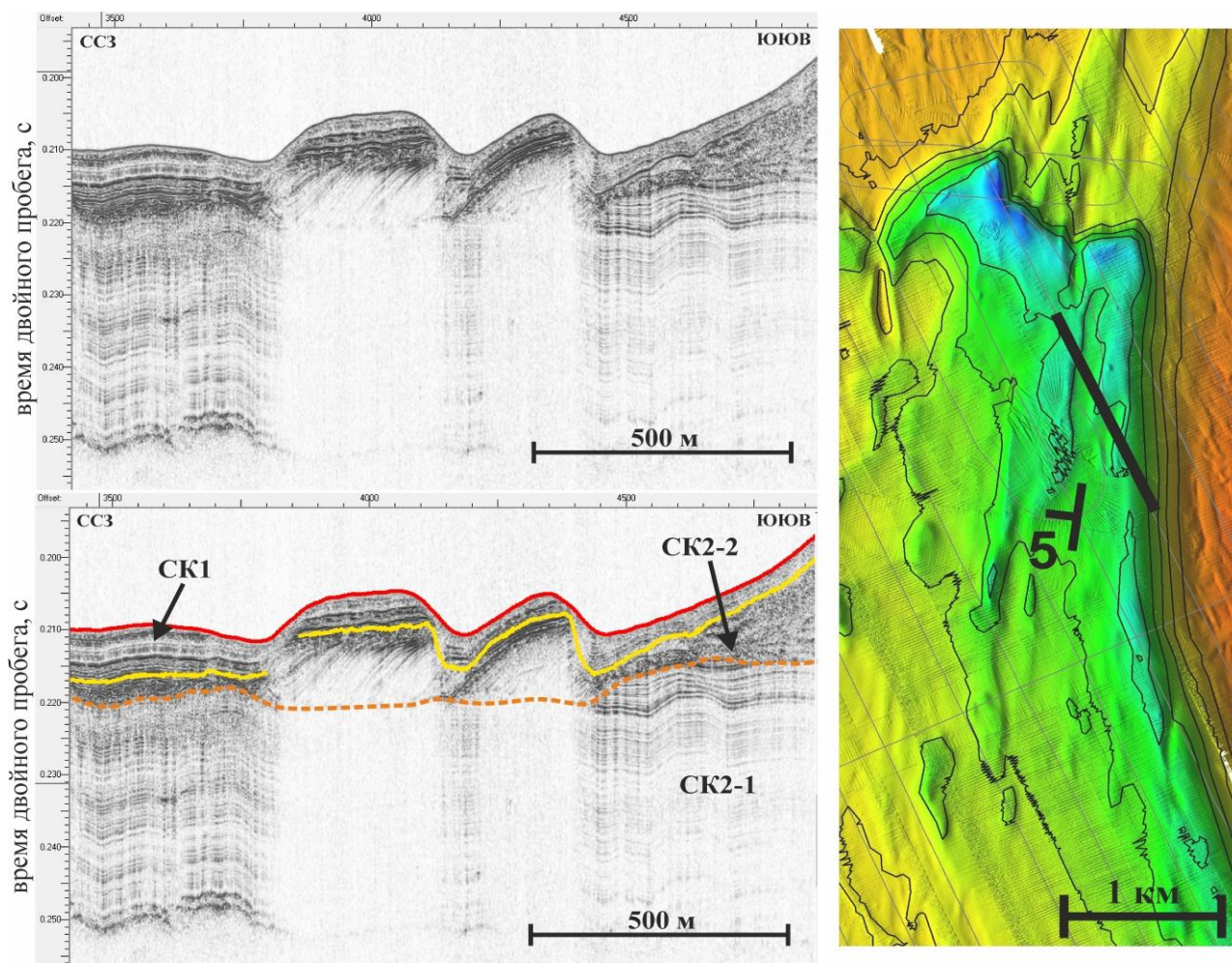


Рисунок 3. Слева сверху - профиль АПр без интерпретации, слева снизу - с интерпретацией: красный горизонт - отражение от дна, жёлтый - подошва комплекса СК1 (голоценовые морские осадки), оранжевый пунктир - подошва косослоистого подкомплекса СК2-2. Справа чёрной линией указано положение фрагмента профиля на данных батиметрической съёмки и указаны элементы залегания слоистости отложений, слагающих гряду, серые линии – профили АПр

Сложный характер слоистости комплекса СК2 похож на описываемые в литературе текстуры мелководно-морского и прибрежного осадконакопления в условиях действия приливно-отливных течений либо при преобладании действия волн и штормов (Reading, 1978; James, Walker, 1992). Гряды и валы, сложенные косослоистыми отложениями, похожи на описанные в ряде работ дюны (Bristow et al, 2000; Wille, 2005; Репкина и др., 2022), а также на приливно-отливные и барьерные песчаные валы (James, Walker, 1992).

Анализ газонасыщенности приповерхностной части разреза

Повсеместно на участке на разрезах АПр встречаются разноуровневые газовые аномалии. Низ разреза экранируется газовым фронтом, который характеризуется неровной геометрией и высокой амплитудой отражения кровли. На мелководных участках из-за обилия рассеянного газа наблюдается преимущественно хаотическая или акустически прозрачная волновая картина с редкими фрагментами слоистости (Рисунок 4). Похожая по структуре волновая картина была также описана на шельфе Печорского и Карского морей в границах зоны развития многолетнемёрзлых пород (Рокос С. И. и др., 2009; Рекант, 2011). На данный момент нет достоверных сведений о наличии многолетнемёрзлых пород в районе исследований, но имеются косвенные данные о криогенных образованиях в районе острова Уединения (Токарев и др., 2022), а также описаны многолетнемёрзлые породы на некоторых островах Карского моря.

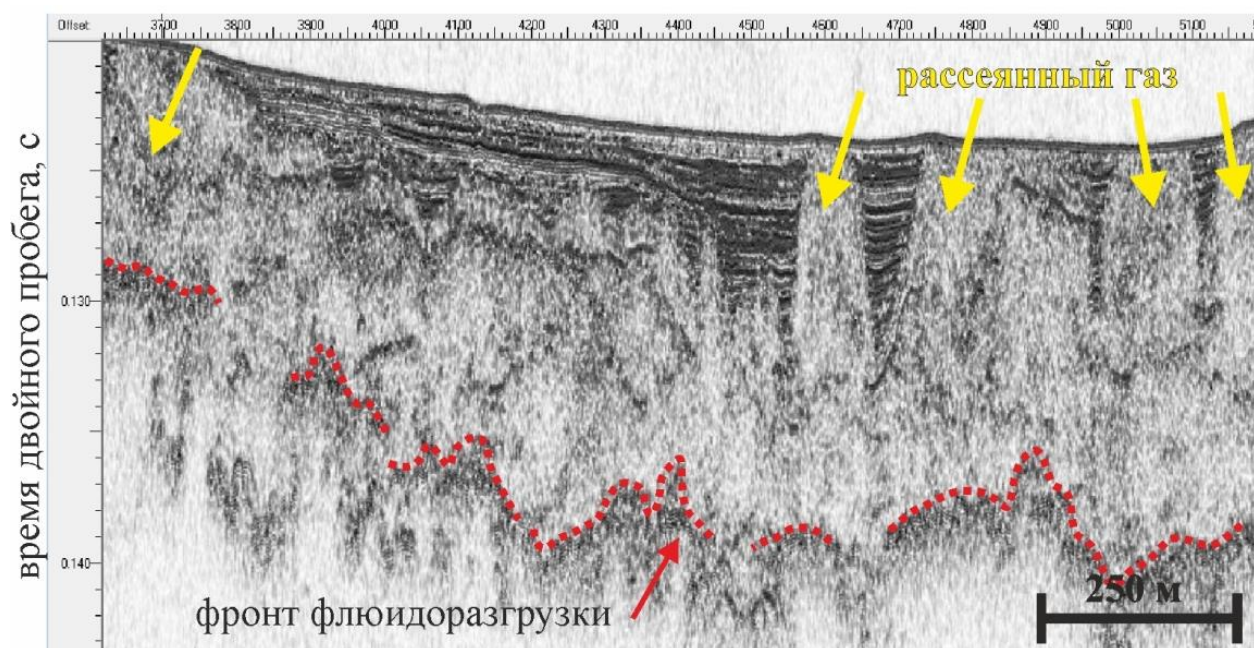


Рисунок 4. Профиль АПр с примерами признаков газонасыщенности: жёлтые стрелки указывают на зоны концентрации рассеянного газа, красным пунктиром обозначен фронт флюидоразгрузки

В разрезе встречаются газоподводящие каналы, над которыми в рельефе дна наблюдаются поднятия либо впадины (покмарки) (Рисунок 5). Подобные поднятия – т.н. купола газового пучения или дома – также были описаны в Карском море в зоне деградации многолетнемёрзлых пород (Миронюк, Иванова 2019). Для образования покмарок спусковым механизмом могла послужить экзарационная деятельность айсбергов (Миронюк, Росляков 2019).

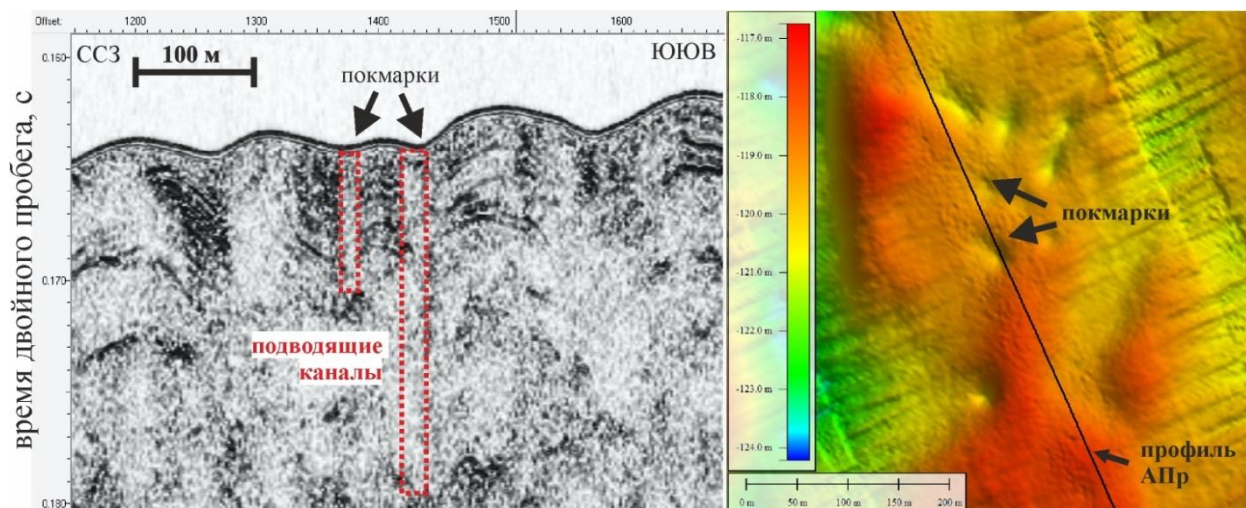


Рисунок 5. Профиль АПр (слева), чёрные стрелки указывают на покмарки. Справа представлены батиметрические данные с указанием положения рассматриваемого профиля АПр и покмарок

В северной мелководной части участка присутствуют газовые шапки с инверсией фазы в их кровле (Рисунок 6). В той же области можно наблюдать инверсию фазы в подошве верхнего комплекса слоистых отложений.

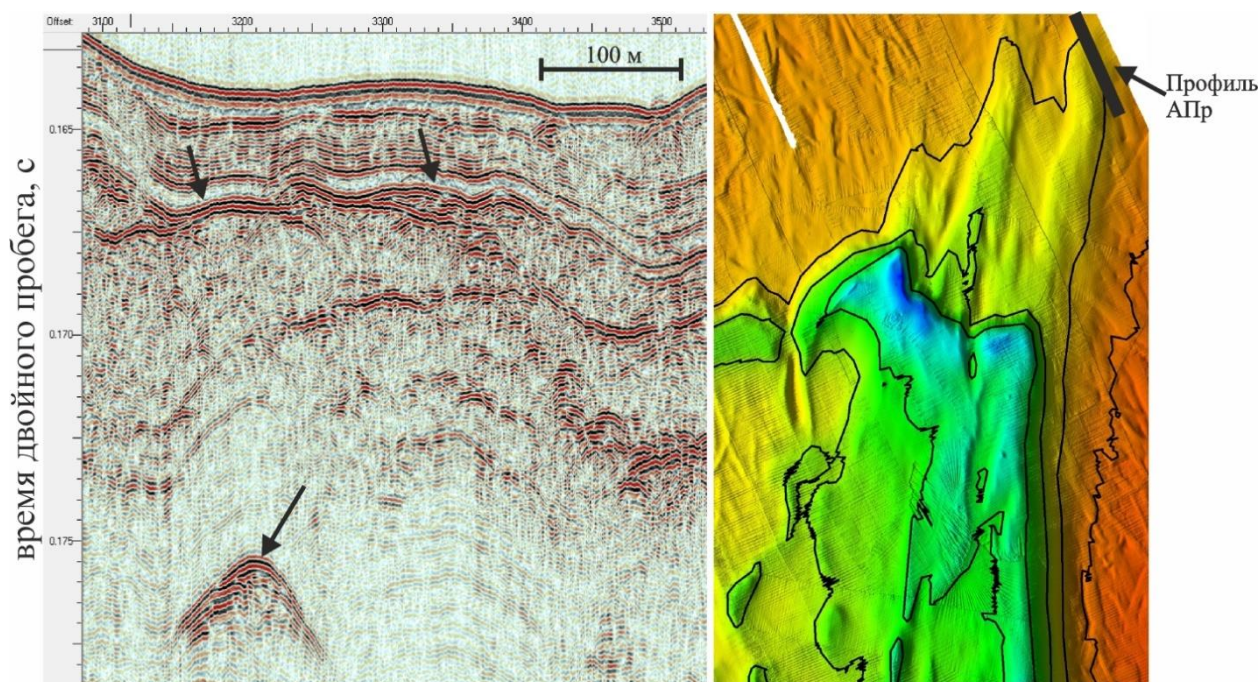


Рисунок 6. Профиль АПр до применения огибающей (слева): чёрные стрелки указывают на инверсию фазы на подошве слоистых отложений и на газовой шапке. Справа указано положение профиля на батиметрических данных

Для анализа характера изменения свойств донных осадков была проведена кластеризация с использованием четырёх признаков, рассчитанных по данным АПр: амплитуды донного отражения, коэффициента донного отражения, акустического импеданса и центральной частоты донного отражения. При расчёте коэффициента отражения в дополнение к данным АПр привлекались результаты геологического пробоотбора и УЗИ на

керне. Кластеризация осуществлялась при помощи библиотеки scikit-learn на языке программирования Python по методу k-средних с разбиением на 3 кластера, предварительно проводилась стандартизация значений признаков. Распределение полученных кластеров на площади приведено на рисунке 7.

По литологическому описанию всюду на участке первые метры разреза сложены алевропелитами. Можно сделать вывод, что изменение значений рассчитанных атрибутов связано с влиянием на свойства осадков рассеянного газа: в областях его концентрации закономерно понижаются значения акустического импеданса и центральной частоты донного отражения. Кластеризация позволила оценить изменение характера газонасыщения придонных осадков на участке исследований.

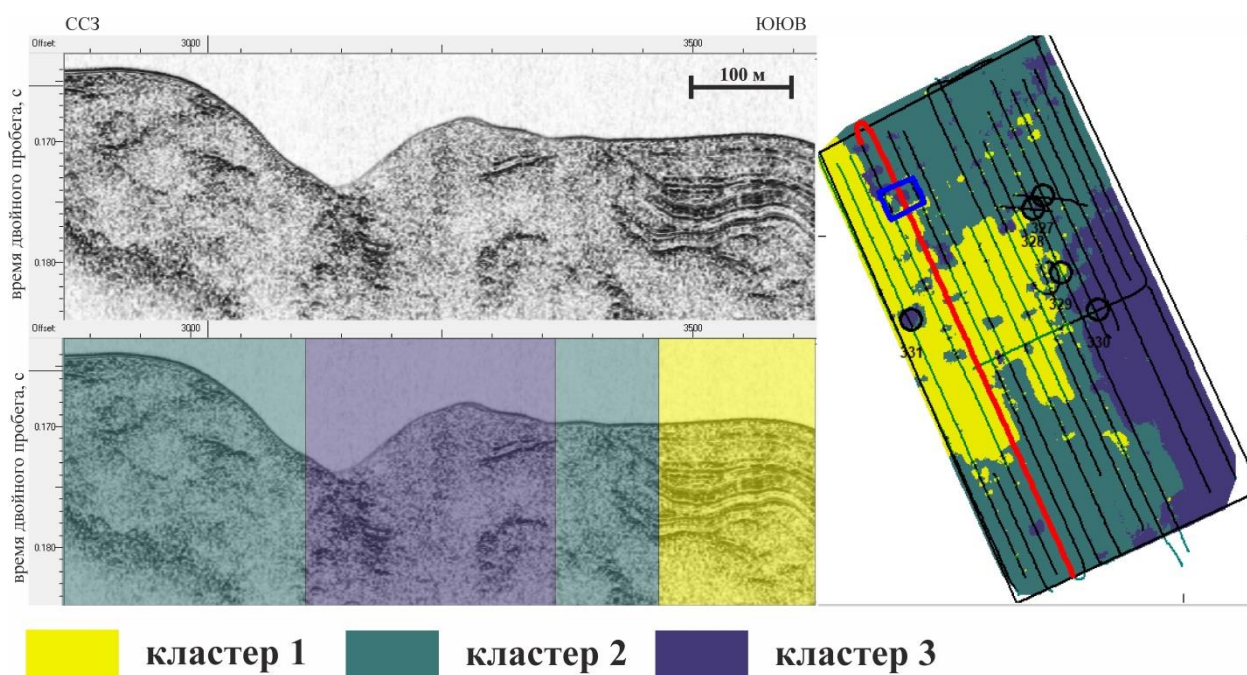


Рисунок 7. Сопоставление результатов кластеризации с видом волновой картины в верхней части разреза на сейсмограммах АПр. Сверху приведён фрагмент сейсмограммы

АПр, снизу – наложение разбиения на три кластера. Справа приведён результат кластеризации на участке исследований с указанием положения профилей АПр и станций геологического прободоотбора: красным цветом выделен рассматриваемый профиль, синим квадратом – фрагмент профиля на иллюстрации.

Заключение

По результатам сейсмостратиграфического анализа данных АПр на участке «Врез» были выдвинуты предположения о формировании двух верхних сейсмокомплексов: прибрежно-морское осадконакопление в ходе трансгрессии сменилось накоплением нефелюидных морских осадков. Были также описаны подводные валы и гряды на участке, сложенные косослоистыми отложениями. Предположительно, описанные объекты являются реликтовыми дюнами или приливно-отливными барьерными песчаными валами, погребёнными под слоем современных морских осадков.

Участок исследований характеризуется наличием различных проявлений флюидоразгрузки в разрезе: на сейсмограммах АПр выделяются разноуровневые газовые аномалии и зоны концентрации рассеянного газа. Наблюдаются также газовые трубы под покмарками и под локальными возвышенностями рельефа.

С целью типизации донных осадков был проведён расчёт амплитуды донного отражения, коэффициента отражения, акустического импеданса и центральной частоты донного отражения по данным АПр. Указанные атрибуты использовались в качестве признаков при кластеризации. Сопоставляя результаты кластеризации с данными геологического пробоотбора и разрезами АПр, были сделаны следующие выводы: донные осадки литологически однородны на всей площади участка, изменения свойств осадков связано с различной концентрацией рассеянного газа вблизи поверхности дна.

Список литературы:

1. Васильев В. В., Вискунова К. Г., Кийко О. А., Козлов С. А. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия СевероКарскоБаренцевоморская. Лист Т41–44 - мыс Желания. Объяснительная записка. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013, 200 с. + 3 вкл.
2. Репкина Т. Ю. и др. Рельеф и внутренне строение донного массива на левобережье р. Шойны (Канинский берег Белого моря): результаты полевых исследований //Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2022. – №. 9. – С. 216-221.
3. Bristow C. S., Bailey S. D., Lancaster N. The sedimentary structure of linear sand dunes //Nature. – 2000. – Т. 406. – №. 6791. – С. 56-59.
4. Hughes A. L. C. et al. The last Eurasian ice sheets—a chronological database and time-slice reconstruction, DATED-1 //Boreas. – 2016. – Т. 45. – №. 1. – С. 1-45.
5. Reading, H. G. Sedimentary environments and facies. // Oxford – 1978.
6. James N. P., Walker R. G. Facies models: Response to sea level change. // St. John's, Nfld.: Geological Association of Canada, 1992.
7. Миронюк С. Г., Иванова А. А., Хлебникова О. А. Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазоносности недр шельфа //Морские исследования и образование (MARESEDU-2018). – 2019. – С. 120-131.
8. Миронюк С. Г., Росляков А. Г. Типы, активность и закономерности распространения покмарок в арктических морях //Морские исследования и образование (MARESEDU-2018). – 2019. – С. 70-76.
9. Рекант П. В., Васильев А. А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе Карского моря //Криосфера Земли. – 2011. – Т. 15. – №. 4. – С. 69-72.
10. Рокос С. И. и др. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания //Инженерные изыскания. – 2009. – №. 10. – С. 38-41.
11. Токарев М. Ю. и др. ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОКРЕСТНОСТИ ОСТРОВА УЕДИНЕНИЯ (КАРСКОЕ МОРЕ) //Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. – 2022. – №. 9. – С. 258-261.

УДК 550.8.012

Рубрика 37.01.05

**ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫЕ ЭФФЕКТЫ В СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ
НАБЛЮДЕНИЯХ**

FREQUENCY DEPENDENT EFFECTS IN SEISMOACOUSTIC SURVEYS

Яковенко Артем Дмитриевич, Токарев Михаил Юрьевич

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Iakovenko Artem, Tokarev Mickhail

Moscow State University, Moscow

Введение

Изучение частотно-зависимых параметров волнового поля по данным морских сейсмоакустических исследований представляет интерес при исследовании четвертичных отложений Арктической зоны РФ, так как потенциально может дать дополнительную информацию об объектах, в частности, связанных с опасными геологическими процессами и явлениями. Информация о частотно-зависимых параметрах может быть полезна как для идентификации таких объектов, так и для уточнения их свойств.

Целью данной работы являлся обзор существующих методов оценки частотно-зависимых эффектов. В данной работе собрана информация о таких частотно-зависимых эффектах, как поглощение, рассеяние на микронеоднородностях, рассеяние на шероховатой границе, частотно-угловой зависимости отражений упругих волн, а также рассмотрен метод сейсмической локации бокового обзора, основанный на обратном рассеянии.

Поглощение

При распространении упругих волн в среде происходит переход части их энергии в тепло. Этот эффект называется неупругим поглощением. Наличие поглощения в среде приводит к уменьшению амплитуды и частоты сейсмического сигнала. При этом высокие частоты затухают быстрее, чем низкие, из-за чего данный эффект является частотно-зависимым (Рисунок 1).

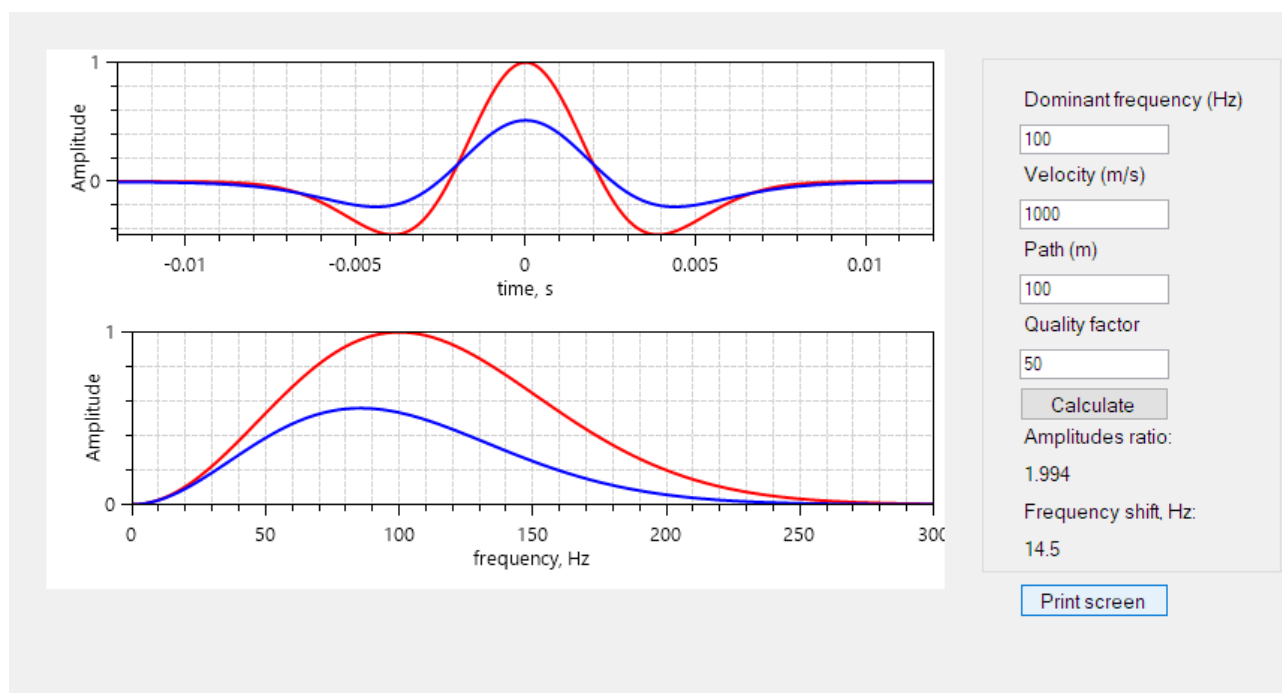


Рисунок 1. Моделирование влияния поглощения на модельный импульс (вверху) и его спектр (внизу). Красным цветом показан импульс до влияния поглощения, синим - после.

Поглощение может быть оценено как на данных, полученных методом отражённых волн в модификации общей глубинной точки (МОВ ОГТ), так и на данных вертикального сейсмического профилирования (ВСП) [Zhang, Ulrych, 2002]. Для получения оценки поглощения в спектральной области необходимо оценить амплитудные спектры сигнала в верхней и нижней частях исследуемого интервала. Такие спектры можно получить, например, с использованием спектрально-временных преобразований, таких как преобразование Фурье в скользящем окне, вейвлет преобразования, преобразование Вигнера-Вилла [Ville, 1948], преобразование Стоквелла [Stockwell et. al., 1996]. Последнее принято считать наиболее оптимальным с точки зрения спектрально-временной разрешённости за счёт наличия адаптивных весовых окон по времени и частоте. В сейсморазведке принято оценивать поглощение через параметр добротности Q . Данный параметр может быть использован для компенсации эффекта поглощения (Q -компенсации).

Помимо непосредственного вычисления параметра добротности, существуют другие возможности оценки поглощения. С помощью спектрально-временных преобразований можно оценивать амплитудные и фазовые спектры на разных временных уровнях. Кроме того, можно разделить высокую частоту сигнала на низкую. Получаемый параметр называется псевдопоглощением.

Также можно провести фильтрацию в трёх различных полосах частот. Затем данным в каждой полосе частот поставить в соответствие красный, зелёный или синий цвет. После этого можно анализировать эти цвета совместно. Получаемый результат называется RGB-представлением (Рисунок 2)

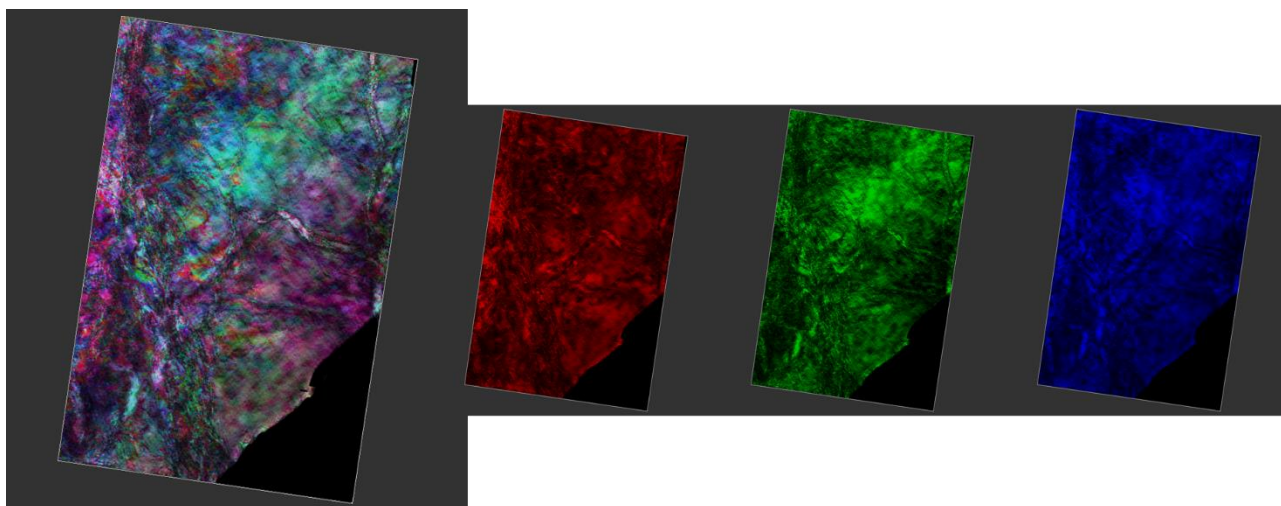


Рисунок 2. RGB-представление данных на горизонтальном срезе (слева). Красный цвет соответствует частоте 15 Гц, зелёный - 25 Гц, синий - 30 Гц.

Рассеяние

В работе рассмотрены два вида рассеяния: рассеяние на микронеоднородностях и рассеяние на шероховатой границе.

Рассеяние на микронеоднородностях встречается вместе с эффектом поглощения, и по данным приповерхностной сейсморазведки пока что эти эффекты разделить не удаётся. Тем не менее, считается, что рассеянием на микронеоднородностях пренебрежимо мало при $Q > 30$ [Sun et. al., 2009]. В работе [Пирогова, 2019] предлагается применять совместную инверсию данных ВСП и скважинных каротажей для разделения частотно-зависимых эффектов поглощения и рассеяния.

Понятие шероховатости по Рэлею означает наличие неровностей поверхности, превышающих следующую величину [Гик, 1982]:

$$\Delta = \frac{\lambda}{8} \cos(\theta)$$

λ – длина волны зондирующего сигнала

θ – угол падения (отражения)

Наличие таких неровностей приводит к нарушению синфазности при суммировании в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля. Это приводит к ослаблению отражённой волны по сравнению со случаем гладкой границы и появлению волн, распространяющихся в других направлениях.

Частотно-угловая зависимость отражений упругих волн

Помимо эффектов поглощения и рассеяния на амплитуду отражённой волны может влиять наличие слоистости и сдвиговых волн в консолидированных слоях. В работе [Студеничник, 2002] приведены примеры зависимости коэффициента отражения звука от дна для разных частот в разных угловых диапазонах, в которых видна существенная зависимость коэффициентов отражения от частоты, связанная с влиянием слоистости верхнего слоя осадков, которое увеличивается с ростом частоты излучающего сигнала.

Сейсмическая локация бокового обзора

В работе рассмотрен метод сейсмической локации бокового обзора, который потенциально может применяться вместе с МОВ-ОГТ. Этот метод основан на выделении рассеянных волн, энергия которых определяется интенсивностью трещиноватости горных пород в области первой зоны Френеля. Схема наблюдения, предпочтительная при проведении наземной сейсморазведки, представлена ниже (Рисунок 3).

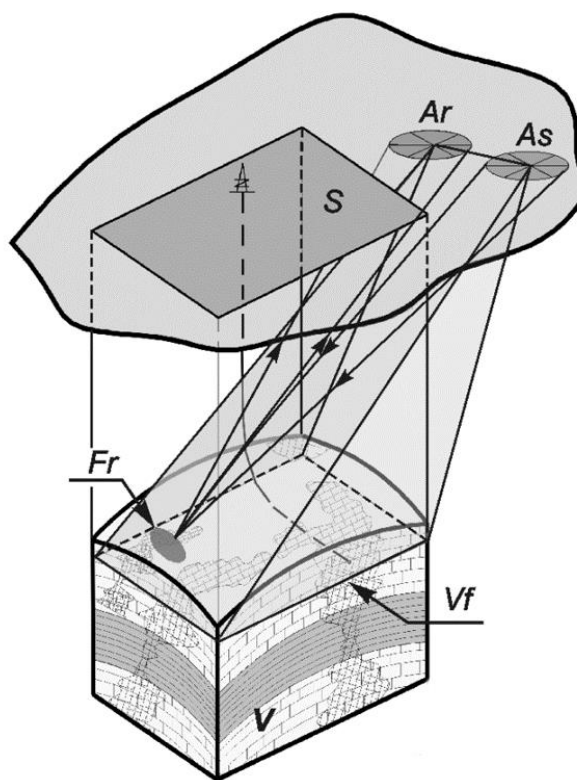


Рисунок 3. Схема наблюдения методом СЛБО. Ar, As – апертуры приёма и излучения сейсмических волн соответственно, S – изучаемая площадь, V – изучаемый объём, Vs – зона трещиноватости, Fr – первая зона Френеля (Кузнецов и др., 2017)

Метод сейсмической локации бокового обзора зарекомендовал себя в наземной глубинной сейсморазведке, однако потенциально может быть применён к данным морских сейсмоакустических наблюдений, изначально полученным методом МОВ ОГТ.

Выводы

Обзор существующих методов оценки частотно-зависимых эффектов показал их широкое разнообразие и возможности применения для выявления и характеристики опасных геологических процессов и явлений в пределах Арктического шельфа. Полученные сведения являются основой для дальнейшего их применения на сейсмоакустических данных.

Список литературы:

1. Гик Л.Д., Харламов С.М., Держи Н.М., Влияние рассеивающих границ на проходящие сейсмические волны // Геология и геофизика, 1982 серия 9, No 8.

2. Кузнецов О.Л., Гайнанов В.Г., Радван А.А., Чиркин И.А., Ризанов Е.Г., Колигаев С.О., Применение сейсмических рассеянных и эмиссионных волн для повышения эффективности освоения месторождений углеводородов // Вестник Московского Университета, 2017, серия 4, No. 4.
3. Пирогова А.С., Разделение частотно-зависимых эффектов рассеяния и поглощения сейсмических волн посредством совместной инверсии данных ВСП и скважинных каротажей // Вестник Московского Университета, 2019, серия 4, No. 4.
4. Студеничник Н.В., Исследования коэффициента отражения звука от дна в диапазоне углов полного внутреннего отражения // Акустический журнал, 2002, том 48, No. 4, с. 539-546.
5. Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R. P., Localization of the complex spectrum: The S Transform // IEEE Transactions on signal processing, 1996, Vol. 44, No. 4, P. 998-1001.
6. Sun L.F., Milkereit B., Schmitt D.R., Measuring velocity dispersion and attenuation in the exploration seismic frequency band // Geophysics, 2009, Vol. 74, No. 2.
7. Ville J., Theorie et applications de la notion de signal analytique // Cables et Transmissions, 1948, Vol. 2, No. 1, P. 61-74.
8. Zhang C., Ulrych T. J., Estimation of quality factors from CMP records // Geophysics, 2002, Vol. 67, No. 5, P. 1542-1547.

Приложение

Appendix

Том I (IV) / Volume I (IV)

Оглавление / Contents

Программа конференции / Conference programme

Тезисы / Abstracts

Пленарная сессия

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ НИШИ В БЕЛОМОРСКИХ ПРИБРЕЖНЫХ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМАХ <u>Краснова Е.Д.</u> , Воронов Д.А., Лабунская Е.А., Лобышев В.И., Соколовская Ю.Г.	19
---	----

Гидрология суши. Устные доклады

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК КРЫМА В 21 ВЕКЕ <u>Калугин А.С.</u> , Мотовилов Ю.Г., Попова Н.О., Миллионщикова Т.Д.	26
РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДЕЛЬТЕ РЕКИ ЛЕНЫ В АВГУСТЕ 2022 Г. <u>Магрицкий Д.В.</u> , Чалов С.Р., Гармаев Е.Ж., Прокопьева К.Н.	31
СЦЕНАРНАЯ ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ БУДУЩЕГО ВОДНОГО РЕЖИМА Р. УРАЛ <u>Попова Н.О.</u> , Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г.	37
СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ГОРОДСКОМ (НОВОСПАССКИЙ ПРУД) И ФОНОВОМ (ОЗЕРО ГЛУБОКОЕ) ВОДОЕМАХ <u>Гречушников М.Г.</u>	42
ВНУТРИГОДОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ РЕКИ ЛЕНА <u>Дрегваль М.С.</u> , Решин Н.А., Гайдукова Е.В.	46
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ВОДНОГО СТОКА Р. КОЛЫМЫ К СОВРЕМЕННЫМ КЛИМАТИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЯМ <u>Лисина А.А.</u> , Крыленко И.Н., Калугин А.С., Сазонов А.А., Фролова Н.Л., Мотовилов Ю.Г.	50
УДИВИТЕЛЬНАЯ ГИДРОДИНАМИКА ПРИЛИВНЫХ УСТЬЕВ <u>Алабян А.М.</u> , Демиденко Н.А., Панченко Е.Д.	55
ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ УРОВНЕЙ ВОДЫ В УСТЬЯХ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ И ПЕЧОРЫ <u>Панченко Е.Д.</u> , Лебедева С.В.	58
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ И ТРАНСПОРТ НАНОСОВ В ГИПЕРПРИЛИВНОМ ЭСТУАРИИ РЕКИ СЁМЖА (БЕЛОМОРСКИЙ БАССЕЙН) <u>Федорова Т.А.</u> , Беликов В.В., Алабян А.М., Демиденко Н.А.	63
ОДНОМЕРНАЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРИЛИВА В УСТЬЕ РЕКИ ПЕЧОРА <u>Алавердова А.А.</u>	71
ПАМПИНГ-ЭФФЕКТ В ГЕОСРЕДАХ <u>Лапина Л.Э.</u>	79
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПЛЕРОВСКОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА ТЕЧЕНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СУММАРНОГО СТОКА НАНОСОВ <u>Иванов В.А.</u> , Чалов С.Р.	83
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ПРИБРЕЖНЫХ ОБВОДНЁННЫХ КАРЬЕРОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ <u>Домнин Д.А.</u> , Завада Д.Е.	90
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕДОВОГО ЗАТОРА В ЗОНЕ РАСШИРЕНИЯ РУСЛА <u>Крутов А.Н.</u> , Школьников С.Я.	96
ОСОБЕННОСТИ ТУМАНОВ КАСПИЙСКОГО МОРЯ <u>Наурызбаева Ж.К.</u> , Базарбай Л.	103
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В АРКТИЧЕСКИХ ОЗЕРАХ <u>Алексеева Н.К.</u> , Евграфова С.Ю., Децура А.Е., Гузева А.В.	108

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВОДНОГО ЗОНДА-ПРОФИЛОГРАФА «ВИНЧИ» В ЛИМНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ОЗЕРА ГЛУБОКОЕ, РУЗСКИЙ РАЙОН, МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ) <u>Островский А.Г.</u> , Кочетов О.Ю., Швоев Д.А., Волков С.В., Зацепин А.Г., Мысливец И.В., Коровчинский Н.М.	111
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ КОЛЬСКОЙ АЭС НА МЕТАБОЛИЗМ РЫБ ОЗ. ИМАНДРА <u>Гашкина Н.А.</u>	118
ВЛИЯНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫПАДЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОЧВЕННЫХ ВОД ВАЛДАЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ПАРКА <u>Баранов Д.Ю.</u>	123
СБАЛАНСИРОВАННАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ: ИНТЕГРАЦИЯ РАЗНОРОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИ ПОСТРОЕНИИ МОДЕЛИ ТРАНСФОРМАЦИИ АТМОСФЕРНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ (МЕДНО-НИКЕЛЕВЫЕ КОМБИНАТЫ) НА ВОДОСБОРЕ И В ОЗЕРЕ <u>Соколов А.В.</u> , Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.	128
МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ФОСФОРА В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ, ПИТАЮЩИХ ИВАНЬКОВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ (РЕКА ВОЛГА) <u>Лапина Е.Е.</u> , Кудряшова В.В.	134
ЗАГРЯЗНЕНИЕ ВОД МЕТАЛЛАМИ В ПЕРИОД СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ НАГРУЗОК И ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА (НА ПРИМЕРЕ КОЛЬСКОГО СЕВЕРА) <u>Базова М.М.</u> , Моисеенко Т.И.	140
МИНЕРАЛИЗАЦИЯ И РАСХОДЫ ВОДЫ РЕК ЦЕНТРАЛЬНОГО КАВКАЗА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ <u>Кучменова И.И.</u> , Атабиева Ф.А.	147
ОСОБЕННОСТИ СЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ДИНАМИКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА ЗА 1998-2022 <u>Новикова Ю.С.</u> , Бакалагин В.Н.	152
ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ (ГИС) И НАБОРОВ ОТКРЫТЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕК И РЕЧНЫХ БАСЕЙНОВ (НА ПРИМЕРЕ, БАСЕЙНА РЕКИ ПО (ИТАЛИЯ)) <u>Игнатъева М.Н.</u>	157

Гидрология суши. Стендовые доклады

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ВОД БАСЕЙНА РЕКИ СЕТУНЬ <u>Соловьева С.С.</u> , Ефимова Л.Е., Ерина О.Н., Терешина М.А., Соколов Д.И.	162
ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАТОРОВ ЛЬДА НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЫ РЕКИ СУХОНЫ) <u>Цуй Ю.</u> , Фролова Н.Л., Семенова Н.К.	168
ЧТО ТАКОЕ ПРОСАДКА ГРУНТА В АРКТИЧЕСКИХ ДЕЛЬТАХ? <u>Долгополова Е.Н.</u>	172
ПРОСАДКА ГРУНТА В ДЕЛЬТАХ РЕК: ПРИЧИНЫ И ПОСЛЕДСТВИЯ <u>Михайлова М.В.</u> , Исупова М.В.	178
АНАЛИЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ Р. СЕТУНИ ЧАСТИЦАМИ МИКРОПЛАСТИКА <u>Нифантьева В.И.</u> , Алиева А.М., Андропова С.М., Артамонов М.С., Соколова Д.И., Беркович А.К., Ефимова А.А., Лисина А.А., Сазонов А.А.	186
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОГРАФОВ Р. ТОМЬ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ <u>Разаренова А.Д.</u> , Крыленко И.Н.	192
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО СТОКА РЕК, НЕ ОХВАЧЕННЫХ СТАЦИОНАРНЫМ ГИДРОЛОГИЧЕСКИМ МОНИТОРИНГОМ <u>Магрицкий Д.В.</u>	197
ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ РЕКИ ОХТА <u>Ярмалоян А.А.</u> , Урусова Е.С.	204
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ТОРФЯНИКА ВИТТИГРЕНСКОГО <u>Борисенко А.Д.</u> , Напреев М.Г., Королёва Ю.В.	209
ОБЗОР МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОЗЕРНО-РЕЧНЫХ СИСТЕМ И ИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИЗУЧЕННОСТИ В СЕВЕРО-ЗАПАДНОМ РЕГИОНЕ РФ <u>Батмазова А.А.</u> , Гайдукова Е.В., Винокуров И.О.	216
ДИНАМИКА КАЧЕСТВА ВОД РЕКИ РУДНАЯ БАСЕЙНА ЯПОНСКОГО МОРЯ <u>Костык В.А.</u> , Кролевецкая Ю.В., Вихренко С.В.	221

Морские млекопитающие. Устные доклады

ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ БЕЛЫХ МЕДВЕДЕЙ (URSUS MARITIMUS) БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ И КАРСКОЙ СУБПОПУЛЯЦИЙ <u>Алексеева Г.С.</u> , Иванов Е.А., Мизин И.А., Платонов Н.Г., Мордвинцев И.Н., Рожнов В.В., Найдено С.В.	226
--	-----

ЗАРАЖЕННОСТЬ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (<i>PUSA SIBIRICA</i> GMELIN, 1788) НЕМАТОДОЙ <i>CONTRACAECUM OSCULATUM</i> BAICALENSIS Суворова И.В., Белокобыльский И.Ф.	234
ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ И ЦИТОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (<i>PUSA SIBIRICA</i> GMELIN, 1788) Суворова И.В., Мищенко П.В., Ячмень В.А., Пущин И.И.	237
ГЕНЫ ГЛАВНОГО КОМПЛЕКСА ГИСТОСОВМЕСТИМОСТИ В ПОПУЛЯЦИОННО-ГЕНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – НА ПРИМЕРЕ ИЗУЧЕНИЯ ЛАСТОНОГИХ Мещерский И.Г.	243
ОСОБЕННОСТИ АЛЛЕЛЬНОГО РАЗНООБРАЗИЯ ГЕНОВ ГЛАВНОГО КОМПЛЕКСА ГИСТОСОВМЕСТИМОСТИ (MHC) КЛАССА II ТЮЛЕНЕЙ ЗАКРЫТЫХ ВОДОЕМОВ Мещерский С.И., Мещерский И.Г., Крюкова Н.В., Соловьева М.А., Болтнев Е.А., Рожнов В.В.	246
КОГНИТИВНЫЕ ФУНКЦИИ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА СНА Лямин О.И.	250
ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРМОНОВ В ВИБРИССАХ БАЙКАЛЬСКОЙ (<i>PUSA SIBIRICA</i> , GMELIN, 1788) И КАСПИЙСКОЙ (<i>PUSA CASPICA</i> , GMELIN, 1788) НЕРП Шибанова П.Ю., Соловьева Мария Андреевна, Рожнов В.В., Найдено С.В.	256
МОНИТОРИНГ ЗАЛЕЖЕК ЛАДОЖСКОЙ НЕРПЫ В ШХЕРНО-ОСТРОВНОМ РАЙОНЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА С 1989 ПО 2021 ГГ. Медведев Н.В., Сипиля Т., Дудакова Д.С.	263
НОВЫЕ ДАННЫЕ О РАЗМНОЖЕНИИ БАЛТИЙСКОГО СЕРОГО ТЮЛЕНЯ <i>HALICHOERUS GRYPUS MACRORHYNCHUS</i> В РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ ЮЖНОЙ БАЛТИКИ В 2021-2023 ГГ. Шадрина А.В., Ежова Е.Е.	267
МИГРАЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ КИТООБРАЗНЫХ В АКВАТОРИИ МЫСА ВАНКАРЕМ (АРКТИЧЕСКОЕ ПОБЕРЕЖЬЕ ЧУКОТСКОГО МОРЯ) В 2017- 2021 ГГ. Загребельный С.В.	274
ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ ПЛАСТИКА В СОДЕРЖИМОМ ЖЕЛУДКА СЕРЫХ КИТОВ (<i>ESCHRICHTIUS ROBUSTUS</i>) МЕЧИГМЕНСКОГО ЗАЛИВА (БЕРИНГОВО МОРЕ, ЧУКОТКА) Астафурова А.В., Ильинский В.В., Ильина О.В., Елисеев А.А.	280
НАБЛЮДЕНИЯ КИТООБРАЗНЫХ НА ТРАЛОВОМ ПРОМЫСЛЕ В ЧЕРНОМ МОРЕ В 2023 ГОДУ Лыгановская В.Д., Барабашин Т.О.	284
ИЗМЕНЕНИЯ В ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ БЕЛУХ (<i>DELPHINAPTERUS LEUCAS</i>) НА АКВАТОРИИ СОЛОВЕЦКОГО РЕПРОДУКТИВНОГО СКОПЛЕНИЯ ПОСЛЕ 20 ЛЕТ ЛОДОЧНОГО ТУРИЗМА (2000–2021 ГГ.) Краснова В.В., Беликов Р.А., Чернецкий А.Д., Таганова М.М., Беликова Е.А.	288
СИВУЧ И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО - ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНКУРЕНЦИИ ЗА ОБЩИЕ ВИДЫ ГИДРОБИОНТОВ Усатов И.А., Труханова И.С., Алтухов А.В., Бурканов В.Н.	295
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ЧИСЛЕННОСТЬ БЕЛОМОРДОГО ДЕЛЬФИНА В РОССИЙСКИХ ВОДАХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ЛЕТОМ-ОСЕНЬЮ 2012-2021 ГГ. Клепиковский Р.Н., Кузнецов Н.В.	303
УЧЁТ ТЮЛЕНЕЙ НА П-ОВЕ ФАЙЛДС, О. КИНГ-ДЖОРДЖ (ВАТЕРЛОО) В ЯНВАРЕ – МАРТЕ 2023 ГОДА Чукмасов П.В., Тимшин А.А., Рожнов В.В., Помелов В.Н., Клепиков А.В., Глазов Д.М.	310
ВОЗМОЖНОСТЬ КОНТРОЛЯ ЛЕЖБИЦ МОРЖЕЙ НА АРКТИЧЕСКИХ ОСТРОВАХ С ПОМОЩЬЮ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДНЕГО РАЗРЕШЕНИЯ Кучейко А.А., Бадак Л.А., Чукмасов П.В., Глазов Д.М., Светличная Е.В., Ткачук М.О., Литвинович Н.В.	318
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ БАЙКАЛЬСКИХ НЕРП (<i>PUSA SIBIRICA</i> , GMELIN, 1788) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО ПРОСЛЕЖИВАНИЯ Ильина П.О., Пилипенко Г.Ю., Железный О.М., Соловьёва М.А., Глазов Д.М., Рожнов В.В.	322
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КАСПИЙСКОЙ НЕРПЫ (<i>PUSA CASPICA</i> GMELIN, 1788) ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ ТЕЛЕМЕТРИИ Пилипенко Г.Ю., Соловьева М.А., Глазов Д.М., Климов Ф.В., Ербулеков С.Т., Рожнов В.В.	328
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ МОРЖЕЙ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА И ИХ КОРМОВЫЕ РЕСУРСЫ Соловьева М.А., Гебрук А.А., Артемьева С.М., Глазов Д.М., Рожнов В.В., Ермилова Ю.В., Лазарева Р.Е.	334
МНОГОЛЕТНИЙ МОНИТОРИНГ ОХОТОМОРСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ СЕРЫХ КИТОВ (<i>ESCHRICHTIUS ROBUSTUS</i>): САХАЛИН, КАМЧАТКА, МЕКСИКА Бурдин А.М., Волкова Е.В.	340
РЕЗУЛЬТАТЫ АВИАМОНИТОРИНГА БЕЛЫХ МЕДВЕДЕЙ И МЕСТ ИХ ОБИТАНИЯ НА ОСТРОВЕ ВРАНГЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЗВЕНА БПЛА С БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТЬЮ ПОЛЕТОВ Черноок В.И., Кревер О.Н., Груздев А.Р., Черноок И.В., Михалин В.А., Васильев А.Н.	345
ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ЗАДАЧЕ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ АФАЛИН В ДАННЫХ ПАССИВНОГО АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА Тышко А.А., Криницкий М.А., Шатравин А.В., Беликов Р.А.	349

Морские млекопитающие. Стендовые доклады

АНАЛИЗ ВЫБРОСОВ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В АЗОВСКОМ МОРЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 15 ЛЕТ Цыба О.А., Барабашин Т.О.....	358
НОВЫЕ ДАННЫЕ О СРЕДНЕЙ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ЖИЗНИ ЧЕРНОМОРСКИХ АФАЛИН В ПРИРОДЕ Суворова И.В., Постникова А.Н., Коростелева А.В.....	366
СЛУЧАЙ ТЯЖЕЛОГО ПАРАЗИТОЗА У МОРСКОЙ СВИНЬИ, ВЫБРОСИВШЕЙСЯ ЖИВОЙ НА АЗОВСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КРЫМА В 2020 Г. Суворова И.В., Постникова А.Н., Коростелева А.В.....	369
ВСТРЕЧИ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В АТЛАНТИЧЕСКОМ ОКЕАНЕ В ДЕКАБРЕ 2021 ГОДА – АПРЕЛЕ 2022 ГОДА Чернецкий А.Д., Чукмасов П.В., Третьяков А.В., Третьякова Л.Г., Глазов Д.М., Рожнов В.В.....	373
МОРФОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЛАЦЕНТЫ У ЧЕРНОМОРСКИХ АФАЛИН (<i>TURSIOPS TRUNCATUS PONTICUS</i>) Семенов В.А., Авдеев В.С., Розанова Е.И., Зацепилов И.А., Великородная Ю.И.....	381
СОДЕРЖАНИЕ И ПРИРОДА НЕФТЕПРОДУКТОВ В КАСПИЙСКОМ ТЮЛЕНЕ Кудрявцева А.Д., Бродский Е.С., Шелепчиков А.А., Мир-Кадырова Е.Я., Соловьёва М.А., Рожнов В.В.....	385
УЧЕТЫ БАЙКАЛЬСКОЙ НЕРПЫ (<i>PUSA SIBIRICA</i> , GMELIN, 1788) НА БЕРЕГОВЫХ ЛЕЖИЩАХ О. ТОНКИЙ АРХИПЕЛАГА УШКАНЬИ ОСТРОВА ПО ДАННЫМ ФОТОЛОВУШЕК Ильина П.О., Пилипенко Г.Ю., Шибанова П.Ю., Соловьёва М.А., Глазов Д.М., Разуваев А.Е., Овдин М.Е., Рожнов В.В.....	390
ДИНАМИКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАРГОЙ (<i>PHOCA LARGHA</i>) ЛЕТНЕЙ ЗАЛЁЖКИ НА О. ТОКИ Соловьёва М.А., Глазов Д.М., Шибанова П.Ю., Пилипенко Г.Ю., Рожнов В.В.....	394
БИОАКУСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОРЖЕЙ У О. МАТВЕЕВ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ Беликов Р.А., Шатравин А.В., Панова Е.М., Кочетов О.Ю., Толстой М.Л., Богомолова Ю.М.....	400
РЕТИНАЛЬНАЯ РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ИРРАВАДИЙСКОГО ДЕЛЬФИНА (<i>ORCAELLA BREVIROSTRIS</i>) ПО ДАННЫМ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕТЧАТКИ Масс А.М.....	408
НАРУШЕНИЕ СЛУХОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ У ДЕЛЬФИНА АФАЛИНЫ <i>TURSIOPS TRUNCATUS</i> Левченко А.В., Сысуева Е.В.....	412
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТУРИСТОВ НА ПОВЕДЕНИЕ БАЙКАЛЬСКИХ НЕРП (<i>PUSA SIBIRICA</i> , GMELIN, 1788) НА О. ТОНКИЙ АРХИПЕЛАГА УШКАНЬИ ОСТРОВА Шибанова П.Ю., Ильина П.О., Пилипенко Г.Ю., Соловьёва М.А., Рожнов В.В.....	416
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОХОТОМОРСКОЙ (ЗАПАДНОЙ) ПОПУЛЯЦИИ СЕРОГО КИТА (<i>ESCHRICHTIUS ROBUSTUS</i>) НА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОМ ШЕЛЬФЕ О. САХАЛИН В 2021-2022 ГГ. Моисеева А.В., Бурдин А.М.....	423
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЮЛЕНЕЙ АНТАРКТИКИ Сомов А.Г., Вагин А.В., Стрюков А.А.....	428
АНАЛИЗ МИКРОБИОМА ВЕРХНИХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ПУТЕЙ ОХОТОМОРСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ ГРЕНЛАНДСКОГО КИТА (<i>BALAENA MYSTICETUS</i>) Цидулко А.Г., Сутормин Д.А., Джикия Е.Л., Цидулко Г.А., Раева А.С.....	432
ПОДВОДНОЕ ВОКАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ САМЦОВ АТЛАНТИЧЕСКОГО МОРЖА <i>ODOBENUS ROSMARUS ROSMARUS</i> В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД Панова Е.М., Толстой М.Л., Беликов Р.А.....	440
ИНДИВИДУАЛЬНАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ КАК НОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ КИТООБРАЗНЫХ: ПИЛОТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕЛУХ <i>DELPHINAPTERUS LEUCAS</i> Панова Е.М., Агафонов А.В.....	444
ПОКАЗАТЕЛИ НАГУЛА СЕРЫХ КИТОВ МЕЧИГМЕНСКОГО ЗАЛИВА Белокобыльский И.Ф., Чакилев М.В.....	450
ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРЫМИ КИТАМИ КАМЧАТСКОГО НАГУЛЬНОГО РАЙОНА Волкова Е.В.....	452
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МОРСКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ В ОНЕЖСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ В ИЮЛЕ-АВГУСТЕ 2019 Г. Светочева О.Н., Светочев В.Н.....	457

Рациональное природопользование. Устные доклады

УРОВНИ И ПРИРОДА УГЛЕВОДОРОДОВ В ПРИБРЕЖНЫХ РАЙОНАХ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО МОРЯ В ПОСЛЕДНИЕ ГОДЫ Немировская И.А., Храмцова А.В., Коновалов Б.В.....	462
СОСТАВ И СОДЕРЖАНИЕ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ БАРЕНЦЕВОМ И НОРВЕЖСКОМ МОРЯХ Колтовская Е.В., Немировская И.А.....	468
ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МОРЕЙ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ Цыганков В.Ю.....	472

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ГЕНОВ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ И ЭКОТОКСИЧНОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ АЗОВСКОГО МОРЯ <u>Сазыкина М.А.</u> , Хмелевцова Л.Е., Карчава Ш.К., Климова М.В., Лановая О.Д., Хаммами М.И., Барабашин Т.О., Сазыкин И.С.	476
ГЕНЫ АНТИБИОТИКОРЕЗИСТЕНТНОСТИ И ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РОССИЙСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ <u>Сазыкин И.С.</u> , Онасенко К.А., Ажогина Т.Н., Барабашин Т.О., Карчава Ш.К., Климова М.В., Лицевич А.Р., Сазыкина М.А.	479
СРАВНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИЙ СОЗ В КАМБАЛОВЫХ РЫБАХ ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ МОРЕЙ РОССИИ <u>Донец М.М.</u> , Метревели В.Е., Миронова Е.К., Цыганков В.Ю.	484
ГОСУДАРСТВЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЛОСОСЕВОГО ПРОМЫСЛА НА ДАЛЬНОМ ВОСТОКЕ РОССИИ КАК ЭЛЕМЕНТ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫМИ ЗОНАМИ <u>Никифоров А.И.</u> , Канзепарова А.Н., Шитова М.В.	489
ВЛИЯНИЕ ФОРЕЛЕВЫХ ХОЗЯЙСТВ НА ПРИБРЕЖНЫЕ АКВАТОРИИ <u>Лапенков А.Е.</u>	495
ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ В УПРАВЛЕНИИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕМ НА ПРИМЕРЕ ПОБЕРЕЖЬЯ КАЛИНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ <u>Сукманова Т.В.</u> , Белов Н.С.	498
ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕДАЧНОЙ ФУНКЦИИ ОТ ВОЗВЫШЕНИЙ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ К ОРБИТАЛЬНЫМ СКОРОСТЯМ СВОБОДНЫХ И СВЯЗАННЫХ ВОЛН <u>Кузнецов С.Ю.</u> , Сапрыкина Я.В., Айдоган Б., Аят Б., Штремель М.Н.	506
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЗОННОЙ И МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА <u>Исаев А.В.</u> , Рябченко В.А.	511
ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ МОРСКИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЕЙ (НА ПРИМЕРЕ ОХОТСКОГО МОРЯ) <u>Иванов А.Н.</u> , Фазлуллин С.М.	516
ЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В УПРАВЛЕНИИ МОРСКИМИ РЕСУРСАМИ НА РЕГИОНАЛЬНОМ УРОВНЕ <u>Гринфельдт Ю.С.</u> , Климанова О.А.	521
КУБ ДАННЫХ БЕЛОГО МОРЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МЕСТООБИТАНИЙ МОРСКИХ ЖИВОТНЫХ <u>Титов Г.С.</u>	528
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗРАТНОЙ МИГРАЦИИ НЕРКИ В УСТЬЕ РЕКИ ФРЕЙЗЕР С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ <u>Борисов М.А.</u> , Криницкий М.А.	533
ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗЛИВА НЕФТИ ПРИ ПОГРУЗКЕ В ТАНКЕР С МОРСКОЙ ЛЕДОСТОЙКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ПЛАТФОРМЫ "ПРИРАЗЛОМНАЯ" <u>Долгов А.А.</u> , Барышев Е.М., Зиновьев С.В., Тузов Ф.К.	538
ПРОБЛЕМЫ КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРИБРЕЖНЫМИ ЗОНАМИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ <u>Гришко А.В.</u>	546
РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ: ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ <u>Глебов В.В.</u> , Никитин Д.С.	549
ПРАВОВЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОХРАНЫ МОРСКОЙ СРЕДЫ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ <u>Пономарев М.В.</u>	557
ПРИМЕНЕНИЕ БПЛА ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОРСКОГО МУСОРА НА ПОБЕРЕЖЬЕ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ В 2023 Г. <u>Ершова А.А.</u> , Антонов Е.В., Голубева Е.А.	562
УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ ЗАРОСЛЕЙ ТРОСТНИКА ДЛЯ ДЕМПФИРОВАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ-ОЗЕРА И РЕГИОНАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ КЛИМАТА В ЮФО <u>Люшвин П.В.</u> , Буянова М.О., Челидзе Н.С.	567
МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ НЕФТЯНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВОДАХ ТАГАНРОГСКОГО И ТЕМРЮКСКОГО ЗАЛИВОВ В АЗОВСКОМ МОРЕ <u>Чекменева Н.А.</u> , Долгова А.О.	575
ОПЫТ СРАВНИТЕЛЬНОЙ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ ПРИБРЕЖНЫХ МАКРОФИТНЫХ ЗАРОСЛЕЙ НЕВСКОЙ ГУБЫ ФИНСКОГО ЗАЛИВА <u>Шуйский В.Ф.</u> , Жигульский В.А., Чебыкина Е.Ю.	579
ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАСТИКОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В МОРЯХ АРКТИКИ И РАЙОНАХ ТРАНСГРАНИЧНОГО РЫБОЛОВСТВА - НЕПРЕРЫВНОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ <u>Педченко А.П.</u>	585

Рациональное природопользование. Стендовые доклады

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БЕРЕГОВ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ К РАЗЛИВАМ НЕФТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ <u>Ермолов А.А.</u> , Кизяков А.И.	591
ВЗВЕСЬ И УГЛЕВОДОРОДЫ В СНЕЖНОМ ПОКРОВЕ ПРИМОРСКОГО РАЙОНА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ <u>Щевченко В.П.</u> , Немировская И.А., Котова Е.И.	593

НЕЙСТОННЫЙ СБОР ПЛАСТИКА В МЕСТАХ СЕЗОННОГО СКОПЛЕНИЯ ГРЕНЛАНДСКИХ КИТОВ (<i>BALAENA MYSTICETUS</i>) В РАЙОНЕ ШАНТАРСКИХ ОСТРОВОВ ОХОТСКОГО МОРЯ <u>Морозова М.В.</u> , Чукмасов П.В., Колобов М.Ю., Третьяков А.В., Глазов Д.М., Кантаков Г.А.	599
ИССЛЕДОВАНИЕ АККУМУЛЯЦИИ МОРСКОГО МАКРОМУСОРА НА ПОБЕРЕЖЬЕ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ <u>Воротниченко Е.Р.</u> , Ершова А.А.	603
РАЗВИТИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ МОРЕПОЛЬЗОВАНИЕМ <u>Семеошенкова В.С.</u> , Ерёмина Т.Р., Хаймина О.В., Волощук Е.В.	609
РОЛЬ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО СОЮЗА В ОБЛАСТИ ЗАЩИТЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ <u>Попов Г.Е.</u>	613
ЧИСЛЕННОСТЬ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОТДЕЛЬНЫХ ГРУПП БАКТЕРИЙ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ <u>Зарипова К.М.</u> , Демидова Е.А., Басова Е.Д., Тихонова Е.А., Бурдиян Н.В., Дорошенко Ю.В.	616
СВЯЗЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛАВАЮЩЕГО МИКРОПЛАСТИКА В КАРСКОМ МОРЕ С ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИМИ УСЛОВИЯМИ <u>Поливанова Т.К.</u> , Березина А.В., Пахомова С.В., Якушев Е.В., Мехова О.С., Новиков М.О.	621
РЕГИСТРАЦИЯ ПЛАВАЮЩЕГО МОРСКОГО МАКРОМУСОРА В ХОДЕ ВТОРОГО ЭТАПА РЕЙСА ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА НА НИС «ДАЛЬНИЕ ЗЕЛЕНЦЫ» В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Спирина В.А.</u> , Кривошлык П.Н., Погожева М.П.	629
ВОЗДЕЙСТВИЕ СУБМАРИННОЙ РАЗГРУЗКИ НА ЭКОСИСТЕМУ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ <u>Якимова Е.А.</u>	634
О ПЛАНЕ ДЕЙСТВИЙ ПО СОХРАНЕНИЮ КАСПИЙСКОГО ТЮЛЕНЯ (<i>PUSA CASPICA</i> GMELIN, 1788) В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН <u>Баймуканов М.Т.</u> , Сыдыкова Ж.А., Рыскулов С.Е., Сиражитдинова М.К., Сеиткожина Д.А., Баймуканова А.М.	640
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА НОРВЕЖСКОГО МОРЯ НА ДИНАМИКУ УЛОВОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ТРЕСКИ <u>Булатова Т.В.</u> , Ванюшин Г.П.	648
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТЕНИЙ ПЕСКОЛЮБОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ЭОЛОВЫХ КОМПЛЕКСАХ <u>Костыркин М.М.</u> , Белов Н.С.	653
ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЛАСТИКОВЫЕ ОБЪЕКТЫ В ЗОНЕ МОРСКОГО ПРИБОЯ С ГАЛЕЧНЫМИ И ПЕСЧАНЫМИ ОТЛОЖЕНИЯМИ <u>Чубаренко И.П.</u> , Фетисов С.В., Есюкова Е.Е., Лобчук О.И., Ши Х.	656
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ВРЕД НА ПОЛЯРНЫХ СТАНЦИЯХ: ОПЫТ И МЕТОДИКА ОЦЕНКИ <u>Дорошенко С.В.</u> , Крюков Д.Р.	662

Подводное наследие и водолазные методы. Устные доклады

АНТИЧНЫЕ КОРАБЛИ: ПРОБЛЕМЫ ТИПОЛОГИИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПО ПАМЯТНИКАМ ИХ ИКОНОГРАФИИ И КОРАБЛЕКРУШЕНИЙ <u>Писаревский Н.П.</u>	671
ИСТОРИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ НОВГОРОДСКОГО ВЕЛИКОГО МОСТА X В. <u>Степанов А.В.</u>	678
ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ КЕРЧЕНСКОГО И ТАМАНСКОГО ПОЛУОСТРОВОВ В АНТИЧНОЕ ВРЕМЯ <u>Дикарев В.А.</u>	686
ВОССТАНОВЛЕНИЕ УСЛОВИЙ В АНТИЧНОМ ПОРТУ ФАНАГОРИЯ (ТАМАНСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) ПО МИКРОФАУНЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ <u>Анпилов Н.А.</u> , Хотылев А.О., Ольховский С.В., Латыпова М.Р.	691
ПРОБЛЕМА ДАЛЕКОГО ИМПОРТА СТРОИТЕЛЬНОГО КАМНЯ В ФАНАГОРИИ (ТАМАНСКИЙ ПОЛУОСТРОВ) В 5–3 ВВ. ДО Н.Э. ПО МАТЕРИАЛАМ ПОДВОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ <u>Хотылев А.О.</u> , Ольховский С.В., Майоров А.А.	694
АТОМНАЯ ПОДВОДНАЯ ЛОДКА К-3 «ЛЕНИНСКИЙ КОМСОМОЛ» - ГЛАВНЫЙ ЭКСПОНАТ НОВОГО МУЗЕЯ ВОЕННО-МОРСКОЙ СЛАВЫ <u>Мозговой С.А.</u>	698
ВОССОЗДАНИЕ И ЭКСПОНИРОВАНИЕ БАРКИ С ГРУЗОМ ГРАНИТА ДЛЯ ОБЛИЦОВКИ НАБЕРЕЖНЫХ И ФОРТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА В XIX ВЕКЕ <u>Копейкин М.Л.</u> , Соловьев С.Л.	703
МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ХЕРСОНЕСА ТАВРИЧЕСКОГО С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ <u>Букатов А.А.</u> , Вахонеев В.В., Глазунов В.В., Панченко В.В.	705
ФРЕГАТ "ПЕРВЫЙ": ПОИСК ВОЗМОЖНОГО МЕСТА КРУШЕНИЯ <u>Золотарев О.А.</u>	710

ЭКСПЕДИЦИЯ РОССИЙСКОГО ФЛОТА НА ЗАТОНУВШИЙ ЛИНКОР «СВЯТОЙ ЕВСТАФИЙ ПЛАКИДА» <u>Ткаченко Ю.Г., Хохлов С.А., Бардашов М.Н.</u>	715
ПОДХОД К МОРСКОМУ КУЛЬТУРНОМУ НАСЛЕДИЮ ОСТРОВА КИПР: РЕАКТИВНЫЙ ИЛИ ПРОАКТИВНЫЙ? <u>Атеш М.А.</u>	722
«МОРСКОЙ СБОРНИК» ОБ ИЗУЧЕНИИ МОРСКОГО И ПОДВОДНОГО НАСЛЕДИЯ РОССИИ. К 175-ЛЕТИЮ ГЛАВНОГО МОРСКОГО ЖУРНАЛА <u>Мозговой С.А.</u>	728

Подводное наследие и водолазные методы. Стендовые доклады

ПОДВОДНЫЕ НАХОДКИ КАСПИЙСКОЙ ИСТОРИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ РГО: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БРОНЗОВОГО АРТЕФАКТА <u>Навоева Д.М., Михайлова А.В., Фазлуллин С.М.</u>	736
--	-----

Научно-популярные фильмы

ЗАТОНУВШИЕ КОРАБЛИ В КАСПИЙСКОМ МОРЕ ИЛИ ОПАСНЫЙ «ДВУХСОТЫЙ» РАЙОН СЕВЕРНОГО КАСПИЯ <u>Мендыбаева Д.Б.</u>	740
РОЛЬ МЕДИАКОММУНИКАЦИЙ В РАЗВИТИИ КАРЬЕРЫ УЧЕНОГО И ПРОДВИЖЕНИИ ЛИЧНОГО БРЕНДА НА ПРИМЕРЕ ФИЛЬМА «АРКТИЧЕСКАЯ ОДИССЕЯ» <u>Пупышева Н.В.</u>	744

Приложение.....

СОДЕРЖАНИЕ ТОМА II (IV).....	748
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА III (IV).....	753
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА IV (IV).....	759

Том II (IV) / Volume II (IV)

Оглавление / Contents

Программа конференции / Conference programme

Тезисы / Abstracts

Океанология. Устные доклады

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ СПЕКТРОВ ВЕТРОВОГО ВОЛНЕНИЯ В ЧЕРНОМ И АЗОВСКОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ 2020 Г. <u>Рыбалко А.Д., Мысленков С.А., Архипкин В.С.</u>	17
КВАЗИИНЕРЦИОННЫЕ ВНУТРЕННИЕ ВОЛНЫ, НАБЛЮДАЕМЫЕ В УСЛОВИЯХ ЗИМНЕЙ И ЛЕТНЕЙ СТРАТИФИКАЦИИ <u>Химченко Е.Е., Островский А.Г.</u>	24
СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ КАСПИЙСКОГО МОРЯ <u>Медведев И.П., Широборова А.И.</u>	28
АВТОНОМНЫЙ ПОДВОДНЫЙ ПРИВЯЗНОЙ ЗОНД-ПРОФИЛОГРАФ «ВИНЧИ»: ДОРАБОТКА И ИСПЫТАНИЯ <u>Швоев Д.А., Островский А.Г., Кочетов А.Ю., Зацепин А.Г.</u>	33
ГЕНЕЗИС И ГИДРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ВОД ЯДРА ХОЛОДНОГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО СЛОЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В 2006 ГОДУ <u>Лобчук О.И., Буканова Т.В., Чубаренко И.П.</u>	37
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОРСКОЙ СРЕДЫ <u>Минаев Д.Д.</u>	42
ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЕМА СОДЕРЖАНИЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ ЗА ПОСЛЕДНИЕ 100 ЛЕТ <u>Намятов А.А.</u>	46
СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА <u>Чужикова-Проскурнина О.Д., Проскурнин В.Ю., Мирзоева Н.Ю.</u>	54
РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ (В 89 РЕЙСЕ НА НИС «АКАДЕМИК МСТИСЛАВ КЕЛДЫШ») <u>Лукьянова О.Н., Чульцова А.Л., Зубаревич В.Л., Амбросимов А.К., Щука А. С.</u>	60
СТРУКТУРА ВОД НА РАЗРЕЗЕ ПО 60° С. Ш. В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ: ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИХ МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ <u>Артамонова К.В., Лукьянова О.Н.</u>	66
ГЛОБАЛЬНЫЕ ДАЛЬНИЕ СВЯЗИ И ДИНАМИКА ЭЛЬ-НИНЬО – ЮЖНОГО КОЛЕБАНИЯ В МОДЕЛЯХ СМIP6 <u>Серых И.В., Сонечкин Д.М.</u>	70
ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЗАЛИВЕ ПРЮДС В ПЕРИОД 68-Й СЕЗОННОЙ РАЭ <u>Кашин С.В., Антипов Н.Н., Молчанов М.С.</u>	77
РАСПРОСТРАНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ЦИРКУМПОЛЯРНЫХ ГЛУБИННЫХ ВОД НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ МОУСОНА ПО ДАННЫМ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 67-ОЙ РАЭ <u>Федотова А.А., Кашин С.В.</u>	84
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД В ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКЕ <u>Крашенинникова С.Б., Артамонова К.В., Демидов А.Н., Бабич С.А., Гиппиус Ф.Н., Бабич М.С.</u>	87
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ В РАЙОНЕ РАЗЛОМОВ ВИМА, РОМАНШ И ЧЕЙН (АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАН) <u>Гиппиус Ф.Н., Демидов А.Н., Артамонова К.В., Крашенинникова С.Б.</u>	90
СТРУКТУРА ВОД ГВИАНСКОЙ КОТЛОВИНЫ ПО НОВЕЙШИМ ЭКСПЕДИЦИОННЫМ ДАННЫМ <u>Демидов А.Н., Артамонова К.В.</u>	95
ПОСЛЕДСТВИЯ "ВОЛНЫ ТЕПЛА" 2016-2019 гг. В БЕРИНГОВОМ МОРЕ ДЛЯ РЫБНЫХ ПРОМЫСЛОВ <u>Зуенко Ю.И., Басюк Е.О., САВИН А.Б.</u>	100
ВЛИЯНИЕ СРОКОВ ОЧИЩЕНИЯ ОТО ЛЬДА И НАЧАЛА НАГРЕВА АКВАТОРИИ НА "ЦВЕТЕНИЕ" ФИТОПЛАНКТОНА В БЕРИНГОВОМ МОРЕ <u>Кивва К.К., Сумкина А.А.</u>	108

ЛАГРАНЖЕВ АНАЛИЗ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЕ ОХОТСКОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЯ СКОРОСТИ ПО СПУТНИКОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ <u>Будянский М.В.</u> , Удалов А.А., Пранц С.В.	113
ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНОГО ХРЕБТА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ <u>Елкин Д.Н.</u> , Зацепин А.Г.	119
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В АРКТИКЕ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ «ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ» <u>Козлов И.Е.</u> , Копышов И.О., Фрей Д.И., Зимин А.В., Свергун Е.И., Морозов Е.Г., Медведев И.П., Ширыборова А.И., Сильвестрова К.П., Соловьев Д.М., Плотников Е.В., Гайский П.В., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б.	127
ОЦЕНКА МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАНИЦ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОДНЫХ МАСС НОРВЕЖСКОГО МОРЯ В XXI ВЕКЕ ПО ДАННЫМ ПЛОЩАДНЫХ СЪЕМОК <u>Сентябов Е.В.</u>	130
АДВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ЧЕРЕЗ СЕВЕРО-ЕВРОПЕЙСКИЙ БАССЕЙН <u>Соколов А.А.</u> , Иванов В.В.	135
ФАКТОРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ МЕЖГОДОВЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗРАСТНОЙ СТРУКТУРЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ПЕРИОД ЕГО МАКСИМАЛЬНОГО НАРАСТАНИЯ <u>Егорова Е.С.</u> , Лис Н.А., Миронов Е.У.	142
АНОМАЛЬНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛЮМА РЕКИ ЛЕНА В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД В 2019 ГОДУ <u>Рогожин В.С.</u> , Осадчиев А.А., Коновалова О.П., Калениченко В.О., Кириюшина М.В., Шабалин Н.В.	149
НЕОРГАНИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ ЭМИССИИ МЕТАНА В ПОРОВЫХ ВОДАХ ШЕЛЬФА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ <u>Пургина Д.В.</u> , Моисеева Ю.А., Гусева Н.В., Семилетов И.П.	154
АНАЛИЗ ЗАТУХАНИЯ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ПРИСУТСТВИИ ПЛАСТИКОВОГО МУСОРА. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ <u>Хазанов Г.Е.</u> , Ермаков С.А.	160
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАДИОЛОКАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ КА-ДИАПАЗОНА И ЗАТУХАНИЯ ГРАВИТАЦИОННО-КАПИЛЛЯРНЫХ ВОЛН НА ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ, ПОКРЫТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ПЛЕНКОЙ <u>Доброхотов В.А.</u> , Ермаков С.А., Сергиевская И.А.	165
ОПЕРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ОКЕАНСКОЙ СРЕДЫ <u>Краснодубец Л.А.</u>	170
СИЛЫ И ДИНАМИКА БЕРЕГОВОГО ПРИЛИВА <u>Косарев А.В.</u>	175
ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ В МНОГОСЛОЙНОЙ СРЕДЕ ВОДА-ЛЁД-СНЕГ-АТМОСФЕРА НА ПРИМЕРЕ ФИНСКОГО ЗАЛИВА <u>Кравцова К.В.</u> , Подрезова Н.А.	181
ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРА $\Delta 180$ В ИССЛЕДОВАНИЯХ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Пастухов И.А.</u> , Намятов А.А.	189
МЕЖГОДОВАЯ И ДЕКАДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Трофимов А.Г.</u>	196
ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО ЖЕЛОБА <u>Травкин В.С.</u> , Белоненко Т.В.	201
ТЕЧЕНИЯ АЗОВСКОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕДИЦИОННЫХ СЪЕМОК <u>Григоренко К.С.</u> , Олейников Е.П., Фролова А.Д.	204
СРЕДНЯЯ СТРУКТУРА И ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В РЕТРОСПЕКТИВНЫХ ПРОГНОЗАХ ПО МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ СИСТЕМЫ INM-CM5 <u>Реснянский Ю.Д.</u> , Зеленько А.А., Струков Б.С., Степанов В.Н., Грищун А.С., Воробьева В.В.	207
ОСОБЕННОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ПРИБРЕЖНОЙ ОБЛАСТИ НОВОРОССИЙСК-ГЕЛЕНДЖИК ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С СВЕРХВЫСОКИМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ <u>Григорьев А.В.</u> , Кубряков А.И.	212
СТАТИСТИЧЕСКИЕ И СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА И ИХ СВЯЗЬ С НАБЛЮДАЕМЫМ ПОВЫШЕНИЕМ СОЛЕННОСТИ ВОД АЗОВА <u>Морозова М.И.</u> , Григорьев А.В.	216
ОЦЕНКА ГЛУБИНЫ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ВОД В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ <u>Мысленков С.А.</u> , Осадчиев А.А., Адамовская П.О.	222
МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ ФИТОПЛАНКТОНА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ ПО СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА 2003-2022 ГГ. <u>Мальшева А.С.</u> , Фролова А.В., Морозов Е.А.	227
ВЛИЯНИЕ АПВЕЛЛИНГОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА «А» В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2000-2019 ГГ. <u>Капустина М.В.</u> , Зимин А.В.	234

Океанология. Стеновые доклады

СУБМЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ В ЛАДОЖСКОМ ОЗЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДИОЛОКАЦИИ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД 2019-2022 <u>Атаджанова О.А.</u> , Зимин А.В., Благодатских Е.А., Коник А.А.	241
ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ВИХРЕВЫХ СТРУКТУР В ПОЛЯХ ЭЙЛЕРОВЫХ И ЛАГРАНЖЕВЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА <u>Будянский М.В.</u> , Новоселова Е.В., Травкин В.С., Лебедева М.А., Удалов А.А., Белоненко Т.В.	246
ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ ПОСТУПЛЕНИЯ МИКРОПЛАСТИКА В МОРЯ ЗАПАДНОЙ АРКТИКИ НА ОСНОВЕ АНЛИЗА ВОДНЫХ МАСС <u>Рогачева Ю.Е.</u> , Еремина Т.Р., Ершова А.А.	253
МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ТИХООКЕАНСКОЙ АКВАТОРИИ КАМЧАТКИ И СЕВЕРНЫХ КУРИЛ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ <u>Свергун Е.И.</u> , Коник А.А., Зимин А.В., Атаджанова О.А.	260
ИССЛЕДОВАНИЕ ВИХРЕЙ БЕНГЕЛЬСКОГО АПВЕЛЛИНГА МЕТОДАМИ ЛАГРАНЖЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <u>Ахтямова А.Ф.</u> , Белоненко Т.В., Будянский М.В., Удалов А.А.	265
ПЕРЕПИСЬ И СВОЙСТВА МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ КУРИЛЬСКОЙ КОТЛОВИНЫ ОХОТСКОГО МОРЯ В АЛЬТИМЕТРИЧЕСКУЮ ЭПОХУ <u>Удалов А.А.</u> , Будянский М.В., Пранц С.В.	268
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИНОПТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БЕЛОГО МОРЯ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ <u>Кораблина А.Д.</u> , Кондрин А.Т.	275
ВЛИЯНИЕ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ЮЖНО-КУРИЛЬСКОМ РАЙОНЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ СКОПЛЕНИЙ СКУМБРИИ В 2021-2022 ГГ. <u>Лебедева М.А.</u> , Новиков Ю.В., Самко Е.В., Белоненко Т.В., Будянский М.В.	282
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВИТОСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА В 1979-2022 ГГ. <u>Попова В.Г.</u>	290
ПРИРОДА ТЕЧЕНИЙ МОРЕЙ И КРУПНЫХ ОЗЕР <u>Щевьев В.А.</u>	293
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТРЕНДОВ ЗНАЧИТЕЛЬНЫХ ВЫСОТ ВОЛН В КАРСКОМ МОРЕ <u>Круглова Е.Е.</u> , Мысленков С.А.	300
ВЛИЯНИЕ АБИОТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МИНТАЯ НА РАННИХ ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА НА АКВАТОРИИ ТИХОГО ОКЕАНА, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ПОЛУОСТРОВУ КАМЧАТКА <u>Коник А.А.</u> , Тепнин О.Б., Зимин А.В., Варкентин А.И., Атаджанова О.А., Софьина Е.В., Романенков Д.А., Свергун Е.И., Саушкина Д.Я., Родикова А.Е.	308
ЭВОЛЮЦИЯ БАРОКЛИННЫХ ВИХРЕЙ В ДВУХСЛОЙНОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ НАД ГЛАДКИМ, ШЕРОХОВАТЫМ И НАКЛОННЫМ ДНОМ (ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ) <u>Елкин Д.Н.</u> , Зацепин А.Г.	313
МЕЗОМАСШТАБНЫЕ ВИХРИ АЛЕУТСКОГО ЖЕЛОБА <u>Худякова С.П.</u> , Травкин В.С., Белоненко Т.В.	321
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ОКЕАНИЧЕСКОГО ТЕПЛА В ПРОЛИВЕ ФРАМА <u>Демченко А.Ю.</u> , Башмачников И.Л.	329
ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ЭКВАТОРИАЛЬНОГО ТИХООКЕАНСКОГО ТЕРМОКЛИНА С АНОМАЛИЯМИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В ПЕРИОДЫ ФАЗ ЭЛЬ-НИНЬО <u>Поляков В.Д.</u> , Ушаков К.В.	334
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ WRF НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ <u>Фомин В.В.</u> , Выручалкина Т.Ю.	341
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УСВОЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ НА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ МОРСКОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОХОТСКОГО И ЯПОНСКОГО МОРЕЙ <u>Фомин В.В.</u> , Панасенкова И.И.	346
ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ БАЛТИЙСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ В 1991-2020 ГГ. <u>Воронкова М.С.</u> , Харина А.И., Хаймина О.В.	351
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАТОКОВ РАСПРЕСНЕННЫХ ВОД ОБЪ-ЕНИСЕЙСКОГО ПЛЮМА В ПРОЛИВЕ ВИЛЬКИЦКОГО В ЗИМНЕ-ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД <u>Панасенкова И.И.</u> , Фомин В.В., Осадчиев А.А., Седаков Р.О.	357
РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА В ИЮНЕ 2023 Г. <u>Дервянко Е.Г.</u> , Харина А.И., Воронкова М.С., Татаренко Ю.А., Хаймина О.В.	363
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЛИВА БЪЕРКЕЗУНД В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД <u>Украинцева А.К.</u> , Романов И.А., Коба А.А., Пономарев А.А., Татаренко Ю.А.	369
ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ С УЧЕТОМ ЕГО УРОВНЯ И ПЛОЩАДИ <u>Корщенко Е.А.</u> , Фомин В.В., Панасенкова И.И., Выручалкина Т.Ю.	374

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПОВЕРХНОСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Сумкина А.А., Кивва К.К., Иванов В.В., Смирнов А.В.</u>	379
ВЗВЕШЕННОЕ ВЕЩЕСТВО В КУРШСКОМ ЗАЛИВЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2023 ГОДА <u>Кузнецов П.А., Бубнова Е.С., Ефимова К.А.</u>	382
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗИМНИХ ЗАПРИПАЙНЫХ ПОЛЫНЕЙ В ЮЖНОЙ И ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТЯХ КАРСКОГО МОРЯ В 2018-2023ГГ. <u>Ткачева Е.С., Иванов В.В.</u>	386
РЕЗУЛЬТАТЫ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ВОД АМУРСКОГО ЗАЛИВА <u>Зайцева П.Д., Еремина Т.Р.</u>	391
КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ, ПРОХОДЯЩИХ ЧЕРЕЗ ЧУКОТСКОЕ МОРЕ <u>Филипсон В.А., Гордеева С.М.</u>	398
СРЕДНЯЯ МНОГОЛЕТНЯЯ ОЦЕНКА ПОТОКОВ ВОДЫ, ТЕПЛА И СОЛИ ЧЕРЕЗ БЕРИНГОВ ПРОЛИВ <u>Игнатьев Д.Е., Гордеева С.М.</u>	404
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НУСОМ С НАТУРНЫМИ ДАННЫМИ <u>Косов И.П., Игнатьев Д.Е., Гордеева С.М.</u>	409
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОХОТСКОГО МОРЯ У ПОБЕРЕЖЬЯ ОСТРОВА САХАЛИН <u>Жданова Е.Ю., Новоселова Е.В., Сухих Н.А.</u>	415
ПЛОТНОСТНАЯ СТРАТИФИКАЦИЯ ВОД В ГРЕНЛАНДСКОМ МОРЕ <u>Нагахаватта С. Нипуника, Подрезова Н.А.</u>	422
ПРОЯВЛЕНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ НА ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ В ТРОПИЧЕСКОЙ ЧАСТИ АТЛАНТИКИ <u>Самборская Я.Т., Демидов А.Н.</u>	426
МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ЧЕРНОГО МОРЯ <u>Пилик Д.И., Архипкин В.С., Медведев И.П., Кубряков А.А.</u>	434
ОСОБЕННОСТИ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КУРШСКОГО ЗАЛИВА В ИЮЛЕ 2023 Г. <u>Ганбарова Г.А., Фомина В.П., Муратова А.А., Полухин А.А.</u>	443
ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД МЕЖДУ АРХ. ШПИЦБЕРГЕН И ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА <u>Швед В.А., Иванов В.В.</u>	448
ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ Р. ЛЕНА <u>Моисеева Ю.А., Пургина Д.В.</u>	455
ОСОБЕННОСТИ ПРИЛИВНЫХ ТЕЧЕНИЙ В КУРИЛЬСКИХ ПРОЛИВАХ ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ <u>Ильин В.И., Архипкин В.С.</u>	460
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРОВОГО АПВЕЛЛИНГА В ЕНИСЕЙСКОМ ЗАЛИВЕ ПО ДАННЫМ ДЗЗ <u>Рогожин В.С., Осадчиев А.А.</u>	468
ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОЛУБОЙ И ГЕЛЕНДЖИКСКОЙ БУХТ ЧЁРНОГО МОРЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД <u>Мироненков П.К., Опарин С.А., Самборский Т.В.</u>	472
ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РОССИЙСКОЙ ЧАСТИ КУРШСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2023 ГОДА <u>Буинцева Е.А., Заболотникова Е.Е., Кузнецов П.А., Бубнова Е.С.</u>	478
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОКРАШЕННОГО РАСТВОРЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В КАРСКОМ МОРЕ <u>Коваленко И.И., Крылов И.Н., Булохов А.В., Дроздова А.Н., Лабутин Т.А.</u>	482
ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗВУКА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ЧЕРНОГО МОРЯ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ВРЕМЕНИ <u>Назаренко Ю.В., Сидоров Д.Д., Петников В.Г., Луньков А.А.</u>	487
АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ПРОЛИВЕ БЬЁРКЕЗУНД НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ SENTINEL-2 И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ ЗА ИЮНЬ 2023 ГОД <u>Адамовская П.О., Татаренко Ю.А., Фролова Н.С.</u>	493
ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫБОРА ОСНОВНЫХ МАРШРУТОВ ПЛАВАНИЯ В ЮГО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ КАРСКОГО МОРЯ И ИХ МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ <u>Котельников В.Д., Алексеева Т.А., Федяков В.Е., Брынзюк А.Ю.</u>	498
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ КАРБОНАТНОЙ СИСТЕМЫ ВОД НА КАРБОНОВОМ ПОЛИГОНЕ «ГЕЛЕНДЖИК» В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД <u>Варварова А.О., Полухин А.А., Бердникова Е.К., Мухаметов С.С., Борисенко Г.В., Пронина Ю.О.</u>	503
КАРБОНАТНАЯ СИСТЕМА ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЫ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ ОХОТСКОГО МОРЯ (ЗАЛИВ ШЕЛИХОВА) В ЛЕТНИЙ СЕЗОН <u>Байгубеков К.Р., Семкин П.Ю.</u>	508
БИОГЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА И ОРГАНИЧЕСКИЙ УГЛЕРОД В ПЕНЖИНСКОЙ ГУБЕ И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ АКВАТОРИИ ОХОТСКОГО МОРЯ В ИЮЛЕ 2023 Г. <u>Петрова А.А., Семкин П.Ю.</u>	513

ВИХРЕВЫЕ СТРУКТУРЫ, ТРАССИРУЕМЫЕ ЛЬДОМ В РАЙОНАХ РАБОТ НИС «ДАЛЬНИЕ ЗЕЛЕНЦЫ» В ИЮЛЕ 2023 Г. <u>Благодатских Е.А., Зимин А.В., Козлов И.Е., Новиков Б.А.</u>	517
ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ <u>Медведев И.П., Цуканова Е.С., Крылов А.А.</u>	523
ГЕНЕРАЦИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ИНТЕНСИВНЫМИ ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ В ПРОЛИВЕ КАРСКИЕ ВОРОТА <u>Анкундинов Н.О., Копышов И.О., Козлов И.Е., Zubov A.Г., Коржуев В.А., Павлов М.И., Новиков Б.А., Свергун Е.И., Зимин А.В.</u>	526
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВНУТРЕННИХ ВОЛН ПО ДАННЫМ МИКРОСТРУКТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ <u>Коржуев В.А., Козлов И.Е. Zubov A.Г., Павлов М.И., Анкундинов Н.О.</u>	528
ТОЛЩИНА ПЕРЕМЕШАННОГО ВЕРХНЕГО СЛОЯ В ЖЁЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Адамовская П.О., Осадчиев А.А., Фрей Д.И.</u>	531
ТЕРМОХАЛИННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ВЕТВИ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Забудкина З.В., Осадчиев А.А., Фрей Д.И.</u>	535
ТЕРМОХАЛИННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Савин А.С., Осадчиев А.А., Фрей Д.И.</u>	539
СРАВНЕНИЕ НАТУРНЫХ ТЕРМОХАЛИННЫХ ДАННЫХ И ДАННЫХ ОКЕАНИЧЕСКОГО РЕАНАЛИЗА GLORYS12 В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Малеев Е.А., Фрей Д.И., Осадчиев А.А.</u>	544
ТЕРМОХАЛИННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАМОВСКОЙ ВЕТВИ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Ахтямова А.Ф., Осадчиев А.А., Фрей Д.И.</u>	549
СУТОЧНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТЕРМОХАЛИННОЙ СТРУКТУРЫ МОРЯ В УСЛОВИЯХ ШТОРМА В РАЙОНЕ ОСТРОВА Б. ОРАНКСКИЙ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Мороз А.А., Фрей Д.И., Осадчиев А.А.</u>	554
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В АКВАТОРИИ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА <u>Корнеева А.О., Яцук А.В., Бовсун М.А., Швалов Д.А., Медведева А.А., Малицкий С.И., Новиков О.С.</u>	558
АТМОХИМИЧЕСКИЕ И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПОПУТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЮГО-ВОСТОЧНОМ ПОБЕРЕЖЬЕ ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА (ЗА ПЕРИОД С 19 ПО 31 АВГУСТА В ХОДЕ РЕЙСА №23/4 НИС «ПРОФЕССОР МУЛЬТАНОВСКИЙ», АВГУСТ-СЕНТЯБРЬ 2023 Г.) <u>Медведева А.А., Яцук А.В., Бовсун М.А., Швалов Д.А., Корнеева А.О., Новиков О.С., Малицкий С.И.,</u>	564
ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ ОСВЕЩЕННОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ, РЕГИСТРИРУЕМОЙ ПОГРУЖНЫМ ДАТЧИКОМ В ВЕРХНЕМ ПЕРЕМЕШАННОМ СЛОЕ В ПРИБРЕЖНОЙ АКВАТОРИИ КАМЧАТКИ <u>Давыдова Д.Г., Моисеева Н.А., Чурилова Т.Я., Скороход Е.Ю., Самойлов М.А., Саушева А.А.</u>	570
ОЦЕНКА БИООПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ КАМЧАТКИ <u>Самойлов М.А., Чурилова Т.Я., Моисеева Н.А., Скороход Е.Ю., Давыдова Д.Г., Саушева А.А.</u>	575
АНАЛИЗ МЕЖГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ОСНОВНЫХ ПРОМЫСЛОВЫХ РАЙОНАХ МАРОККО И МАВРИТАНИИ НА БАЗЕ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ <u>Барканова Т.Б., Ванюшин Г.П., Кружалов М.Ю.</u>	581
О НИЗКИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ЧЕРНОГО МОРЯ В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД <u>Валле А.А.</u>	589
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ ВЕСНОЙ 2021 Г. <u>Бабич М.С., Бабич С.А., Крашенинников Б.Н.</u>	591
АППРОКСИМАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ <u>Бусев В.В., Чанцев В.Ю., Клячкин С.В.</u>	594
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ АНТАРКТИЧЕСКОГО АЙСБЕРГА D28 <u>Крыжановская В.Э., Подрезова Н.А.</u>	599
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ВКЛАД МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ И СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОДНОГО БАЛАНСА В МЕЖГОДОВУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ СЕЗОННЫХ КОЛЕБАНИЙ УРОВНЯ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ <u>Виноградов М.В., Захарчук Е.А., Тихонова Н.А., Сухачев В.Н.</u>	603
АНОМАЛИИ pH В ВЕРХНЕМ СЛОЕ ОТКРЫТОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ И РОЛЬ ВОСТОЧНО-АТЛАНТИЧЕСКОГО КОЛЕБАНИЯ <u>Гребнева Е.А.</u>	609
Приложение	614
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА I (IV)	615
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА III (IV)	622
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА IV (IV)	628

Том III (IV) / Volume III (IV)

Оглавление / Contents

Программа конференции / Conference Programme

Тезисы / Abstracts

Морская биология. Устные доклады

НЕКОТОРЫЕ ДАННЫЕ О МИКРОСКОПИЧЕСКОЙ АНАТОМИИ <i>SYMBION PANDORA</i> (CYCLOPHORA) <u>Борисанова А.О.</u>	18
НОВАЯ МЕЙОБЕНТОСНАЯ НЕМЕРТИНА – КОГДА СЕГМЕНТЫ ОПЯТЬ НЕ ИМЕЮТ ЗНАЧЕНИЯ <u>Чернева И.А., Королёва А.С., Неретина Т.В.</u>	23
АДАПТИВНЫЙ ТРЕЙДОФФ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ФАКУЛЬТАТИВНОГО К ОБЛИГАТНОМУ СИМБИОЗУ У БРЮХОНОГИХ МОЛЛЮСКОВ <u>Дгебуадзе П.Ю., Мехова Е.С.</u>	27
АДГЕЗИОННЫЕ ОРГАНЫ СО СЛОЖНОЙ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМОЙ – СТРОЕНИЕ РОПАЛОИДОВ <i>HALICLYSTUS AURICULA</i> (CNIDARIA: STAUROZOA) <u>Домрачева М.М., Хабибулина В.Р., Салова И.А.</u>	33
ОРГАНИЗАЦИЯ СРЕДНЕЙ КИШКИ ПИКНОГОНИД <i>PHOXICHILIDIUM FEMORATUM</i> (ARTHROPODA, CHELICERATA) <u>Алексеева Н.В.</u>	38
БИОРАЗНООБРАЗИЕ МАЛАКОФАУНЫ В СИСТЕМЕ КАСПИЙ-МАНЫЧ-ПОНТ В ПОСЛЕДнюю МЕЖЛЕДНИКОВую ЭПОХУ <u>Янина Т.А., Сорокин В.М., Семиколенных Д.В.</u>	42
НОРМАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ И ОСОБЕННОСТИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА МИНИАТЮРНЫХ ИНТЕРСТИЦИАЛЬНЫХ АННЕЛИД: НЕОЖИДАННЫЕ ФАКТЫ О РОЛИ КАРЛИКОВЫХ САМЦОВ У <i>DIMORPHILUS GYROCILATUS</i> <u>Матвеева Е.П., Фофанова Е.Г., Воронежская Е.Е.</u>	50
СТРОЕНИЕ НЕРВНО-МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ ПОЛИПОВ И ЭФИР <i>LINUCHE SP.</i> (SCYPHOZOA: CORONATAE) <u>Салова И.А., Домрачева М.М., Хабибулина В.Р.</u>	57
УТОЧНЕНИЕ ВИДОВОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ЧЕРНОМОРСКОЙ ПЛЕВРОБРАХИИ МЕТОДАМИ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЛОГЕНЕТИКИ <u>Баяндина Ю.С., Кулешова О.Н.</u>	60
ЭКСКРЕТОРНАЯ СИСТЕМА МОРСКОГО ПАУКА <i>AMMOTHEA HILGENDORFI</i> (ВÖНМ, 1879) (PYCNOGONIDA: AMMOTHEIDAE) <u>Богомолова Е.В., Петрова М.А.</u>	63
ОПТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОСТРАКОД – КЛЮЧ К ОЦЕНКЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ И АБСОЛЮТНОЙ ПАЛЕОГЛУБИНЫ (КАЛИБРОВКА МЕТОДА) <u>Тесакова Е.М.</u>	71
ГЕНЕТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ ПОПУЛЯЦИЙ ХЕМОСИМБИОТРОФНЫХ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ <i>CALYPTOGENA PACIFICA</i> (VESICOMYIDAE: PLEOCARDIINAE) БЕРИНГОВА МОРЕЯ И ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА <u>Белов Д.А., Кременецкая А.В., Крылова Е.М.</u>	79
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЖЕСТКИХ СТРУКТУР У ВЫМЕРШИХ И СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ МШАНОК ИЗ КЛАССА STENOLOAEMATA <u>Вахрушев А.Е., Темерева Е.Н.</u>	82
ТРАНСМИССИВНАЯ НЕОПЛАЗИЯ МИДИЙ Р. MYTILUS В МОРЯХ РОССИИ <u>Сказина М.А., Стрелков П.П.</u>	90
УЛЬТРАСТРУКТУРА ЭПИТЕЛИЕВ ЛОФОЗОРА И ЩУПАЛЕЦ <i>NOVOCRANIA ANOMALA</i> (BRACHIOPODA, CRANIIFORMEA) <u>Пландин Ф.А., Темерева Е.Н.</u>	95
МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОРГАНИЗАЦИИ НЕРВНОЙ И МЫШЕЧНОЙ СИСТЕМЫ МАНТИИ БРАХИОПОДЫ <i>HEMITHIRIS PSITTACEA</i> (RHYNCHONELLIFORMEA: RHYNCHONELLIDA) <u>Ратновская А.В., Кузьмина Т.В.</u>	99
СЕКРЕТ ХЕНАСОЕЛОМОРФНА <u>Константинова Ю.И., Темерева Е.Н.</u>	104
МЕТАМОРФОЗ SPIRALIA <u>Тайманова О.И., Темерева Е.Н.</u>	111

БИОГЕОГРАФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА CNIDARIA КАРСКОГО МОРЯ <u>Журавлева Н.Е.</u>	116
МИКРОБНЫЕ СООБЩЕСТВА ДОННЫХ ОСАДКОВ МОРЕЙ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИЙСКОЙ АРКТИКИ <u>Брюханов А.Л.</u>	120
СТРУКТУРА МИКРОБНОГО СООБЩЕСТВА ВОДНОЙ ТОЛЩИ КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ <u>Салова В.Д., Холдина А.М., Клокина А.А., Гаврилова Л.А., Щербакова П.А., Шестаков А.И., Бонч-Осмоловская Е.А.</u>	125
БАКТЕРИОПЛАНКТОН ЗАЛИВОВ КАРСКОГО МОРЯ: АРХИПЕЛАГИ СЕВЕРНАЯ И НОВАЯ ЗЕМЛЯ <u>Бычкова У.В., Романова Н.Д., Воробьева О.В.</u>	129
ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ТРОФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ МАКРОБЕНТОСА В ЛАГУННОЙ ЭКОСИСТЕМЕ НИКОЛЬСКОЙ ГУБЫ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ, БЕЛОЕ МОРЕ) <u>Столяров А.П.</u>	133
КОНСОРТИВНЫЕ СВЯЗИ <i>ZOSTERA MARINA</i> L. В БЕЛОМ МОРЕ У БЕРЕГОВ ОНЕЖСКОГО <u>Мосеев Д.С., Махнович Н.М., Брагин А.В.</u>	137
ЭПИФИТЫ <i>ASCOPHYLLUM NODOSUM</i> (<i>PHAEOPHYCEAE</i>) В ГУБЕ ТЕРИБЕРСКАЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Тупицына С.А., Нерезенко А.М., Рыжик И.В., Малавенда С.В.</u>	142
К ВОПРОСУ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ СЪЕМКИ ЛИТОРАЛИ ПРИ ПОМОЩИ БПЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСОВ ВОДОРΟΣЛЕЙ <u>Гурова П.Д.</u>	148
АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННО-ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ МОРСКИХ ПТИЦ В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ <u>Болдырев С.Л.</u>	156
ВЛИЯНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ НА ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ОБИЛИЕ СИМБИОНТОВ КОРАЛЛА <i>POCILLOPORA VERRUCOSA</i> <u>Петроченко Р.А., Лищенко Ф.В., Бурмистрова Ю.А., Бритаев Т.А.</u>	164
РОСТ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ ДВУСТВОРЧАТОГО МОЛЛЮСКА <i>MACOMA CALCAREA</i> (GMELIN, 1791) ВО ФЬОРДАХ О. ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН <u>Носкович А.Э.</u>	171
ОФИУРЫ GORGONOSERNALIDAE (ECHINOERMATA: ORNITHOIDEA: EURYALIDA): ПРЕДСТАВИТЕЛИ СЕМЕЙСТВА НА ПОДВОДНЫХ ГОРАХ ИМПЕРАТОРСКО-ГАВАЙСКОГО ХРЕБТА <u>Волкова А.Л., Даутова Т.Н., Даутов С.Ш.</u>	177
ЭФФЕКТИВНОСТЬ КАМУФЛЯЖА И ФОРМА РАКОВИНЫ СИМБИОТИЧЕСКОГО МОЛЛЮСКА <i>PHENACOVOLVA ROSEA</i> НА РАЗНЫХ ВИДАХ КОРАЛЛОВ ХОЗЯЕВ И В РАЗНЫХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ <u>Звоначева С.С., Мехова Е.С., Лищенко Ф.В.</u>	180
ДИНАМИКА РАЗМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ РЫХЛЫХ ГРУНТОВ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЧЕРНОГО МОРЯ <u>Колочкина Г.А., Любимов И.В., Данилова Н.А.</u>	185
ПИТАНИЕ И ТРОФИЧЕСКИЕ СВЯЗИ РЫБ В ГАЛЕЧНО-ВАЛУННЫХ БИОТОПАХ ПРИЛИВНО-ОТЛИВНОЙ ЗОНЫ АВАЧИНСКОЙ ГУБЫ (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА) <u>Токранов А.М.</u>	190
МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА БИООБРАСТАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ПЛАСТИКОВОГО ФРАГМЕНТА В УСЛОВИЯХ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ <u>Соколов А.Н.</u>	195
О СТАТИСТИЧЕСКОМ СРАВНЕНИИ ХАРАКТЕРА РОСТА ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ <u>Герасимова А.В., Максимович Н.В., Филиппова Н.А., Иванова Т.С.</u>	199
СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ФИТОПЛАНКТОНА МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗЕРА ЕЛОВОЕ, ОТДЕЛЕННОГО ОТ БЕЛОГО МОРЯ, В 2021 Г. <u>Иванова Д.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А., Радченко И.Г.</u>	205
ИЗМЕНЕНИЯ В СООБЩЕСТВАХ МЕГАБЕНТОСА БАРЕНЦЕВА МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ КАМЧАТСКОГО КРАБА И КРАБА-СТРИГУНА ОПИЛИО <u>Захаров Д.В., Манушин И.Е., Йоргенсен Л.Л., Стрелкова Н.А.</u>	209
РАЗНООБРАЗИЕ ЛЕДОВОЙ ФАУНЫ В ЗОНЕ КРОМКИ ЛЬДА КАРСКОГО МОРЯ <u>Прошок Я.П., Тимченко А.И.</u>	214
СТРУКТУРА БИОСФЕРЫ: БИОЦЕНОЗ, БИОМ, ЭКОСИСТЕМА, БИОГЕОЦЕНОЗ <u>Жирков И.А.</u>	218
РЕЗИДЕНТЫ И ЭКСПАТРИАНТЫ В ПЛАНКТОНЕ АРКТИЧЕСКОГО БАСЕЙНА: РОЛЬ В СТРУКТУРЕ СООБЩЕСТВ, ВКЛАД В БИОМАССУ И ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗООПЛАНКТОНА <u>Кособокова К.Н., Осипова Д.Д.</u>	224
ДИНОФЛАГЕЛЛЯТЫ КОМПЛЕКСА "ВРЕДНОСНОГО "ЦВЕТЕНИЯ" ВОДЫ В АВАЧИНСКОЙ ГУБЕ (ВОСТОЧНАЯ КАМЧАТКА) <u>Лепская Е.В., Тепнин О.Б.</u>	230
СОСТАВ ПИГМЕНТОВ И ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ФИТОПЛАНКТОНА КУРШСКОГО ЗАЛИВА (БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ) ЛЕТОМ 2023 ГОДА <u>Щербаков С.А., Ланге Е.К.</u>	235

КАРТЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ БЕРЕГОВ К РАЗЛИВАМ НЕФТИ. ВОПРОСЫ ПОСТРОЕНИЯ И СФЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ КОЛЬСКОГО ЗАЛИВА, БАРЕНЦЕВА МОРЯ <u>Ващенко П.С.</u>	239
СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И ХЛОРОФИЛЛА РАЗМЕРНЫХ ГРУПП ПОВЕРХНОСТНОГО ФИТОПЛАНКТОНА КАРСКОГО МОРЯ <u>Тюрина А.С., Демидов А.Б., Белевич Т.А., Воробьева О.В.</u>	244
ИХТИОЛОГИЧЕСКИЙ РЕЛИКТ <i>ARAPAIMA GIGAS</i> – УНИКАЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ МИРОВОЙ АКВАКУЛЬТУРЫ <u>Бобкова А.А., Никифоров А.И.</u>	250
ИЗУЧЕНИЕ ВИДОВОГО СОСТАВА ПОКОЯЩИХСЯ СТАДИЙ ДИНОФИТОВЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ОСАДКАХ БЕРИНГОВА ПРОЛИВА И ЧУКОТСКОГО МОРЯ <u>Зверева А.Ю., Орлова Т.Ю., Морозова Т.В.</u>	254
ФИТОПЛАНКТОН МОРЕЙ ЛАПТЕВЫХ И ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ (АВГУСТ 2008) <u>Полякова Е.И., Кловиткина Т.С., Крюкова И.М.</u>	259
МИКРОВОДОРОСЛИ-КРИОФИЛЫ АМУРСКОГО ЗАЛИВА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД 2022 Г. <u>Юрикова Е.А., Бегун А.А., Орлова Т.Ю.</u>	266
ДИНАМИКА ЛИПИДНОГО СОСТАВА <i>TETRASELMIS SUECICA</i> ((KYLIN) BUTCHER, 1959) ПОД ВЛИЯНИЕМ 3-ИНДОЛМАСЛЯНОЙ КИСЛОТЫ В НАКОПИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЕ <u>Барсова Е.А., Лескова С.Е., Михеев Е.В., Ковалев Н.Н.</u>	271
ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ФИТОПЛАНКТОНА И КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА–А С УЧЕТОМ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ СРЕДЫ В ПРИБРЕЖЬЕ ЧЕРНОГО МОРЯ ВЕСНОЙ <u>Крашенинникова С.Б., Минкина Н.И., Самышев Э.З., Ли Р.И., Шокурова И.Г., Бабич С.А., Бабич М.С.</u>	279
ПИТАНИЕ БЫЧКА КУРГЛЯКА В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ ВБЛИЗИ ОСТРОВА СЕСКАР <u>Дарсия Н.А.</u>	282
ПОПУЛЯЦИОННАЯ СТРУКТУРА САЙКИ (<i>BOREOGADUS SAIDA</i>) НА ОСНОВАНИИ ФРАГМЕНТА ГЕНА <i>CYT B</i> В ПРЕДЕЛАХ ШЕСТИ МОРЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА <u>Емельянова О.Р., Григоров И.В., Орлов А.М., Орлова С.Ю.</u>	286
ЗАВИСИМОСТЬ ОТ ПОЛА ЭКСПРЕССИИ ГЕНА ПРОЛАКТИНА В МОЗГЕ И ГЕНОВ <i>NA/K</i> -АТФАЗЫ В ЖАБРАХ ТРЁХИГЛОЙ КОЛЮШКИ <i>GASTEROSTEUS ACULEATUS</i> L. ПРИ ПРЭСНОВОДНОЙ АДАПТАЦИИ <u>Павлова Н.С., Неретина Т.В., Смирнова О.В.</u>	294
МОРФОЛОГИЯ И СИСТЕМАТИКА АНТАРКТИЧЕСКИХ БЕЛОКРОВНЫХ РЫБ РОДА <i>SHANNICHTHYS RICHARDSON</i> , 1844 (<i>NOTOTHEMNOIDEI: SHANNICHTHYDAE</i>) <u>Николаева Е.А.</u>	300
ДИНАМИКА ГОДОВОГО РАЗВИТИЯ СООБЩЕСТВ ОБРАСТАНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ СУСБТРАТОВ В ВЕРХНЕЙ СУБЛИТОРАЛИ БЕЛОГО МОРЯ <u>Чава А.И., Захаров Г.Д., Озеров Д.А.</u>	304
ДАЛЬНОСТЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ЧАСТИЦ В КОЛОНИЯХ ГИДРОИДОВ СЕМЕЙСТВА <i>SAMPANULARIIDAE</i> <u>Дементьев В.С., Марфенин Н.Н.</u>	310
ОПТИМИЗАЦИЯ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕНТАЛИ ПРИ ПОМОЩИ ТНПА <u>Шушков Д.А., Шкрябин А.А., Зуев Ю.А., Зуева Н.В., Гусев Д.В.</u>	317
СЕВЕРОАТЛАНТИЧЕСКИЕ МОРСКИЕ ОКУНИ-ГИГАНТЫ РОДА <i>SEBASTES</i> <u>Рольский А.Ю., Артамонова В.С., Махров А.А., Попов В.И.</u>	321
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОД СЕВЕРНОГО КАСПИЯ ИНДЕКСОМ ГУДНАЙТ-УОТЛЕЯ <u>Кашин Р.Д., Минакова Е.В., Жаткина О.В.</u>	326
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФАУНЫ ДВУСТВОРЧАТЫХ МОЛЛЮСКОВ СУБЛИТОРАЛЬНОЙ И БАТИАЛЬНОЙ ЗОН КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ (АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПЕДИЦИЙ 1948-2019 ГГ.) <u>Лисицына К.Н., Каменев Г.М.</u>	331
ВЫДЕЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВ ФИТОПЛАНКТОНА КУРШСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ, ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ В КАЧЕСТВЕ НОВЫХ АКТИВНЫХ ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ СУБСТАНЦИЙ <u>Смирнов А.Н., Александров С.В., Буччони М., Ламбертуччи К., Маруччи Г., Найданов Д.А., Щербатов С.А.</u>	335
ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ИНТРОДУЦИРОВАННОГО КАМЧАТСКОГО КРАБА (<i>PARALITHODES CAMTSCHATICA</i>) ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВОМОРСКОЙ ПОПУЛЯЦИИ <u>Блинова Д.Ю., Манушин И.Е.</u>	343
НОВЫЕ ДАННЫЕ О ТОНКОМ СТРОЕНИИ АНАЛЬНЫХ МЕШКОВ ЭХИУРИДЫ <i>BONELLIA VIRIDIS</i> (ANNELIDA: BONELLINAE) <u>Кузнецов П.А., Ересковский А.В., Темерева Е.Н.</u>	346
ИНВАЗИЙНЫЕ КРАБЫ КАК НОВЫЕ ПИЩЕВЫЕ ОБЪЕКТЫ РЫБ В БАРЕНЦЕВОМ И КАРСКОМ МОРЯХ <u>Долгов А.В.</u>	351
ГРАНИЦЫ И ГРАДИЕНТЫ СУБЛИТОРАЛЬНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ У МАТЕРИКОВЫХ ПОБЕРЕЖИЙ ЯПОНСКОГО И ОХОТСКОГО МОРЕЙ <u>Дуленин А.А.</u>	356
ПАРАЗИТЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ФИЛОГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ОКУНЯ-КЛЮВАЧА <i>SEBASTES MENTELLA</i> (<i>SEBASTIDAE</i>) <u>Бакай Ю.И.</u>	362

ДИКАЯ ПОПУЛЯЦИЯ ГИГАНТСКОЙ УСТРИЦЫ (<i>MAGALLANA GIGAS</i> (THUNBERG, 1793)) НА АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ <u>Ананьева М.С., Симакова У.В., Тимофеев В.А., Семин В.Л., Колочкина Г.А.</u>	369
СТРАТЕГИЯ ИЗУЧЕНИЯ ПИНГВИНОВ ГУМБОЛЬДТА (<i>SPHENISCUS GUMBOLDTI</i>), СОДЕРЖАЩИХСЯ В "ПРИМОРСКОМ ОКЕАНАРИУМЕ" - ФИЛИАЛЕ ННЦМБ ДВО РАН <u>Сабущкая М.А.</u>	377

Морская биология. Стендовые доклады

МАКСИМАЛЬНЫЙ ВОЗРАСТ <i>SCIAENA UMBRA</i> LINNAEUS, 1758 В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЁРНОГО МОРЯ (КРЫМ) <u>Тамойкин И.Ю.</u>	382
ХАРАКТЕРИСТИКА ПИТАНИЯ НАВАГИ И ТРЕСКИ НА ПОБЕРЕЖЬЕ БЕЛОГО <u>Босва К.В., Иванова Т.С., Иванов М.В., Лайус Д.Л.</u>	386
РЕПРОДУКТИВНАЯ СТРУКТУРА СЕВЕРОХОТОМОРСКОГО МИНТЯ <i>GADUS CHALCOGRAMMUS</i> (GADIDAE), КАК ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ ЗАПАСА <u>Шейбак А.Ю., Смирнов А.А.</u>	389
ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ, ОСОБЕННОСТИ БИОЛОГИИ И ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ ПЯТНИСТОГО СКАТА <i>VATHYRAJA MACULATA</i> В СЕВЕРНОЙ ПАЦИФИКЕ <u>Григорьев И.В., Кивва К.К., Орлов А.М.</u>	394
СРАВНЕНИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВОЗРАСТА ПЕПЕЛЬНОГО МАКРУРУСА <i>CORYPRAENOIDES CINEREUS</i> (GILBERT, 1896) <u>Мельникова Ф.А., Беляев П.С., Трофимова А.О.</u>	399
ЗООПЛАНКТОН ПРИБРЕЖНОЙ ЧАСТИ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ БАЛТИКИ ЛЕТОМ 2023 Г. <u>Казакова Д.М., Полунина Ю.Ю.</u>	405
ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА И СТРУКТУРЫ ЛЕТНЕГО ЗООПЛАНКТОНА ПРИБЕЖНОЙ ЗОНЫ ВИСЛИНСКОГО И КУРШСКОГО ЗАЛИВОВ В 2023 ГОДУ <u>Болотов Э.А., Полунина Ю.Ю.</u>	409
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ЧИСЛЕННОСТИ ФИТО И ЗООПЛАНКТОНА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ <u>Чернышова А.С., Чанцев В.Ю.</u>	413
ОЦЕНКА ВАРИАБЕЛЬНОСТИ ЧЕТЫРЕХ МЕРОМИКТИЧЕСКИХ ВОДОЕМОВ ОКРЕСТНОСТЕЙ БЕЛОМОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МГУ ПО ПИГМЕНТНОМУ СОСТАВУ ВОДНЫХ ФОТОТРОФОВ <u>Нагаева А.С., Гальш А.А., Еланская А.С., Лабунская Е.А., Быкова Е.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А.</u>	415
ПРОИСХОЖДЕНИЕ КЛЕПТОПЛАСТИД ДИНОФЛАГЕЛЛЯТ РОДА <i>DINOPHYSIS</i> ИЗ ЛАГУНЫ НА ЗЕЛЕНОМ МЫСЕ: ПИГМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ <u>Еланская А.С., Гальш А.А., Нагаева А.С., Лабунская Е.А., Быкова Е.А., Краснова Е.Д., Воронов Д.А.</u>	421
АНАЛИЗ ПИГМЕНТНОГО СОСТАВА И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ АЛЬГО-БАКТЕРИАЛЬНЫХ И МАТОВ ЗЕЛЕННЫХ НИТЧАТЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ КИСЛО-СЛАДКОГО ОЗЕРА В ОКРЕСТНОСТЯХ БЭС МГУ ИМ. Н.А. ПЕРЦОВА <u>Гальш А.А., Сидоченко Н.Д., Еланская А.С., Нагаева А.С., Быкова Е.А., Воронов Д.А., Краснова Е.Д.</u>	426
ОЦЕНКА ВИДОВОГО СОСТАВА ПОДЛЕДНОГО АНТАРКТИЧЕСКОГО ФИТОПЛАНКТОНА <u>Швед Я.В., Логинова Н.Б.</u>	434
СУТОЧНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКОЙ СПОСОБНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ (ПОС. РЫБНОЕ, КАЛИНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ) <u>Маховиков А.Д., Мошаров С.А.</u>	439
СТРУКТУРА СООБЩЕСТВ ФИТОПЛАНКТОНА И ИХ ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ПЕЧОРСКОЙ ГУБЕ <u>Сашова О.А., Коновалова О.П.</u>	444
ПОЛИМОРФИЗМ ЗЕЛЕННЫХ СЕРНЫХ БАКТЕРИЙ <i>CHLOROBIVM PHAEOVIBRIOIDES</i> , ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ МЕРОМИКТИЧЕСКОГО ОЗ. БОЛЬШИЕ ХРУСЛОМЭНЫ (О. ОЛЕНИЙ, КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ БЕЛОГО МОРЯ) <u>Лунина А.Л., Беленкова В.В., Лунина О.Н.</u>	449
АНТИБИОТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГРИБОВ, АССОЦИИРОВАННЫХ С КРАСНЫМИ ВОДОРΟΣЛЯМИ <i>ODONTHALIA DENTATA</i> И <i>RHUCODRYS RUBENS</i> <u>Ермишина М.А., Бубнова Е.Н., Чердынцева Т.А., Гавирова Л.А.</u>	456
ОЦЕНКА ЧИСЛЕННОСТИ РЫБ В ПРИБРЕЖНЫХ СООБЩЕСТВАХ В БЕЛОМ МОРЕ <u>Иванова Т.С., Иванов М.В., Полякова Н.В., Лайус Д.Л.</u>	460
ОЦЕНКА БИОМАССЫ НИТЧАТЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ В ОЗЕРЕ КИСЛО-СЛАДКОЕ (КАНДАЛАКШСКИЙ ЗАЛИВ, БЕЛОЕ МОРЕ), ЧАСТИЧНО ИЗОЛИРОВАННОМ ОТ БЕЛОГО МОРЯ <u>Абрамова М.С., Баскаев А.А., Буряк А.Ю., Волков П.А., Ермохин Д.А., Илюшин Е.А., Казакова М.А., Карнаузов В.К., Кравцов И.Д., Кузьмин Н.А., Лапшина К.К., Матерова Т.А., Нехорошева Ю.Е., Шипилова П.А., Ястребов И.А., Григорян И.В., Пархаева А.П., Краснова Е.Д.</u>	463
ИЗУЧЕНИЕ СООБЩЕСТВ МИКРООРГАНИЗМОВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ КАРСКОГО И БАРЕНЦЕВА МОРЕЙ МЕТОДАМИ МЕТАГЕНОМИКИ <u>Мишустина Е.П., Демкина А.О., Мамонтов В.А., Сутормин Д.А., Трофимова А.Б.</u>	471

ПОТЕНЦИАЛЬНО ТОКСИЧНЫЕ ВИДЫ В СТРУКТУРЕ ФИТОПЛАНКТОНА ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ КУРШСКОГО ЗАЛИВА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ ЛЕТОМ 2023 ГОДА <u>Щербяков С.А.</u> , Ланге Е.К., Балашова А.В.	474
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА “а” В КАРСКОМ МОРЕ И СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ИЮЛЕ 2023 Г. <u>Сашова О.А.</u> , Коновалова О.П.	479
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЖИВАЕМОСТИ СЕГОЛЕТОК МАКОМЫ <i>MASOMA VALTHISA</i> В ЗИМНИЙ ПЕРИОД НА ЛИТОРАЛИ БЕЛОГО МОРЯ <u>Ященко И.А.</u> , Новикова С.К., Назарова С.А., Червякова Н.А., Сафонов М.В.	484
ЛИТОРАЛЬНЫЕ СООБЩЕСТВА МАГАДАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЗАПОВЕДНИКА (ОЛЬСКИЙ УЧАСТОК) <u>Булавинова В.И.</u> , Коновалова О.П., Юрикова Д.А., Киселев А.Д.	489
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БЕНТОСНОГО СООБЩЕСТВА НА СТАНЦИИ 6-8 ПОЛИГОНА № 6 ВБЛИЗИ О. МОЛОЧНИЦА КАНДАЛАКШСКОГО ЗАЛИВА БЕЛОГО МОРЯ <u>Табачникова К.С.</u> , Кузнецов К.О., Константинова Ю.И., Поляков Д.И., Гомжин И.О., Петрушкова Т.И., Синицын А.М., Кокорин А.И., Мокиевский В.О.	494
УТОЧНЕНИЕ ФАУНЫ CRINOIDEA В АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ РОССИИ (БЕЛОЕ, БАРЕНЦЕВО, КАРСКОЕ, ЛАПТЕВЫХ, ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ, ЧУКОТСКОЕ) И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ВОДАХ <u>Стратаненко Е.А.</u>	499
ОРГАНИЗАЦИЯ ПОЛОСТИ ТЕЛА У БЕЛОМОРСКОЙ ХЕТОГНАТЫ <i>PARASAGITTA ELEGANS</i> <u>Уразаева А.О.</u> , Темерева Е.Н.	503
<i>DIMORPHILUS GYROCILIATUS</i> - ПЕРСПЕКТИВНАЯ МОДЕЛЬ В ИЗУЧЕНИИ СТАРЕНИЯ <u>Фофанова Е.Г.</u>	505
СВЕТООТРАЖАЮЩАЯ СТРУКТУРА В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ НЕМЕРТИНЫ <i>ARCTOSTEMMA ARCTICUM</i> (NEMERTEA, NORPONEMERTEA): ЧТО НАМ ИЗВЕСТНО? <u>Лихачева Г.В.</u> , Чернева М.А.	507
СТРОЕНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ ПАРТЕНОГЕНЕТИЧЕСКИХ САМОК <i>PODON LEUCARTII</i> (G.O. SARS, 1862) <u>Дегтярева Е.К.</u>	512
ИЗУЧЕНИЕ НАУПЛИАЛЬНЫХ СТАДИЙ КОПЕПОД РОДА <i>CALANUS</i> В КАРСКОМ МОРЕ ЛЕТОМ 2021 ГОДА <u>Ступникова А.Н.</u> , Дриц А.В., Симакова У.В., Москаленко В.Н., Мельникова С.А.	514
УЧАСТИЕ СИГНАЛЬНОГО ПУТИ SWNT В МОЛЕКУЛЯРНОЙ РАЗМЕТКЕ АРХИТЕКТУРНО СЛОЖНОЙ КОЛОНИИ ГИДРОИДНОГО ПОЛИПА <i>DYNAMENA PUMILA</i> <u>Ветрова А.А.</u> , Лебедева Т.С., Кремнёв С.В.	518
ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ АКТИВНОСТИ WNT/ β -КАТЕНИН СИГНАЛЬНОГО ПУТИ НА РАЗВИТИЕ ЭМБРИОНОВ И АГРЕГАТОВ ЭМБРИОНАЛЬНЫХ КЛЕТОК ГИДРОИДНОГО ПОЛИПА <i>GONOTHYRAEA LOVENI</i> (HYDROZOA, CNIDARIA) <u>Соколова М.А.</u> , Калинин А.Н., Лебедева Т.С.	522
АТЛАС СПЕРМАТОЗОИДОВ МОРСКИХ БЕСПОЗВОНОЧНЫХ БЕЛОМОРСКОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ МГУ <u>Каминская А.В.</u> , Морозова В.А.	528
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОДСЧЕТА ОТМЕТОК РОСТА НА СТАТОЛИТАХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА <i>B.</i> <i>OSAGAWAI</i> <u>Хорошутинна О.А.</u> , Ботнев Д.А.	536
ПРОДОЛЖЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ВИДАМИ-ДВОЙНИКАМИ МЕДУЗ РОДА <i>CYANEA</i> В КАНДАЛАКШСКОМ ЗАЛИВЕ БЕЛОГО МОРЯ <u>Новикова В.С.</u> , Кудрявцева Е.И.	539
МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЛИЧИНОЧНОГО МОРФОГЕНЕЗА ГУБКИ <i>HALISARCA DIJARDINII</i> <u>Борисенко И.Е.</u> , Ересковский А.В.	543
НЕИЗВЕСТНАЯ БЕЛОМОРСКАЯ ЛИЧИНКА ИЗ СЕМ. DORVILLEIDAE (ANNELIDA) <u>Королева А.С.</u> , Неретина Т.В., Колбасова Г.Д., Прудковский А.А., Цетлин А.Б.	549
ВЛИЯНИЕ АНТИДЕПРЕССАНТОВ НА ЭМБРИОНАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ <i>STRONGYLOCENTROTUS PALLIDUS</i> и <i>OPHELIA LIMACINA</i> <u>Кисель А.А.</u> , Румянцева С.М.	557
5 ВИДОВ MONOCELIS (PLATYHELMINTHES: PROSERIATA) ИЗ ОДНОЙ ЛУЖИ ОКРЕСТНОСТЕЙ БС МГУ <u>Константинова Ю.И.</u> , Поляков Д.И., Ежова М.А., Неретина Т.В.	560
СИСТЕМАТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕЛОГО МОРЯ: 100 ЛЕТ СПУСТЯ <u>Росинская А.Е.</u> , Агунович К.К., Вержбицкий В.В., Ларшин Б.Б., Тайманова О.И., Чижов Ю.Д., Шапсюк М.С., Жадан А.Э., Кокорин А.И., Михлина А.Л., Мокиевский В.О., Цетлин А.Б.	562
ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГООБРАЗИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА <i>TEREBELLIDES</i> В БЕЛОМ МОРЕ <u>Бушув С.Е.</u> , Кузенков К.А., Ливенский А.Д., Рюмина Е.Д., Жадан А.Э., Гнева Д.Р., Неретина Т.В.	570
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА <i>FLABELLIGERA</i> В БЕЛОМ МОРЕ <u>Парфенова А.С.</u> , Пепеляева Е.В., Ливенский А.Д., Рюмина Е.Д., Неретина Т.В.	573
ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГООБРАЗИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА <i>OPHRYOTROCHA</i> В БЕЛОМ МОРЕ <u>Рохин И.А.</u> , Алферова П.Е., Ливенский А.Д., Рюмина Е.Д., Неретина Т.В.	577
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ РОДА <i>CRYPTONATICA</i> В БЕЛОМ МОРЕ <u>Сафонова В.П.</u> , Фейгин С.Е., Кульбачная М.А., Салимгареев А.С., Чава А.И., Кремнев Г.А., Ливенский А.Д., Рюмина Е.Д., Неретина Т.В.	581

ДОСТИЖЕНИЕ ПОЛОВОЗРЕЛОСТИ ПИНГВИНОВ ГУМБОЛЬДА (<i>SPHENISCUS HUMBOLDTI</i>) В ИСКУССТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ ПРИМОРСКОГО ОКЕАНАРИУМА- ФИЛИАЛА ННЦМБ ДВО РАН <u>Демина О.Д.</u> , Чернышова О.А.	585
К ВОПРОСУ О СТРУКТУРЕ ПОСЕЛЕНИЙ <i>ASTARTA BOREALIS</i> (BIVALVIA: ASTARTIDAE) У СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО КРАЯ АРЕАЛА В БАЛТИЙСКОМ МОРЕ <u>Карташова А.Е.</u> , Ежова Е.Е., Багиров Н.Э.	588
КОЛИЧЕСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ТРОФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ЗООПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВ В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЯХ В СЕНТЯБРЕ 2023 ГОДА <u>Болотов М.И.</u> , Перминова А.С., Юрикова Д.А., Коновалова О.П.	595
ИЗУЧЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ СМЕРТНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА В ЖЕЛОБЕ СВЯТОЙ АННЫ (КАРСКОЕ МОРЕ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИТАЛЬНОГО ОКРАШИВАНИЯ <u>Перминова А.С.</u> , Болотов М.И., Юрикова Д.А., Коновалова О.П.	599
ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОРСКОЙ КОПЕПОДЫ <i>METRIDIA LONGA</i> <u>Раева А.С.</u> , Юрикова Д.А., Коновалова О.П., Сутормин Д.А.	603
ТРОФИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ ДВУХ МАССОВЫХ ВИДОВ ЩЕТИНКОЧЕЛЮСТНЫХ (<i>PARASAGITTA ELEGANS</i> И <i>EUKROHNIА НАМАТА</i>) В ЗООПЛАНКТОННЫХ СООБЩЕСТВАХ АРКТИКИ <u>Артемьев Г.М.</u> , Юрикова Д.А., Коновалова О.П.	608
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БАКТЕРИОПЛАНКТОНА В РАЗЛИЧНЫХ ВОДНЫХ МАССАХ ЖЕЛОБА СВЯТОЙ АННЫ <u>Коновалова О.П.</u> , Папа-Дмитриева Ю.А., Юрикова Д.А.	613
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ИГЛОКОЖИХ ЮГО-ВОСТОЧНОГО И ЮГО-ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ, СОБРАННЫХ В РЕЙСЕ ТИХООКЕАНСКОГО ПЛАВУЧЕГО УНИВЕРСИТЕТА 2023 <u>Волкова А.Л.</u> , Рутенко О.А., Даутова Т.Н.	616
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ИЗУЧЕННОСТЬ ОХОТСКОГО МОРЯ И СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА, ПРИЛЕГАЮЩЕЙ К ПОБЕРЕЖЬЮ КАМЧАТКИ <u>Хокканен С.Н.</u> , Пономарева А.Л.	621
ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗНООБРАЗИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЩЕТИНКОВЫХ ЧЕРВЕЙ (ANNELIDA: POLYCHAETA) ПРИКАМЧАТСКИХ ВОД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ «ТИХООКЕАНСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ 2023» <u>Носков Д.В.</u>	628
ПЕРВИЧНЫЕ ДАННЫЕ О РАЗНООБРАЗИИ ПРИБРЕЖНЫХ И ГЛУБОКОВОДНЫХ СООБЩЕСТВ МАКРОЗООБЕНТОСА В ЮЖНЫХ ПРИКАМЧАТСКИХ ВОДАХ ТИХОГО ОКЕАНА И ОХОТСКОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ ТИХООКЕАНСКИЙ ПЛАВУЧИЙ УНИВЕРСИТЕТ 2023 <u>Доброхотова Д.М.</u> , Рутенко О.А.	633
УГЛЕВОДОРОДОКИСЛЯЮЩИЕ БАКТЕРИИ ХОЛОДНЫХ МОРЕЙ <u>Кокуркина Ю.А.</u> , Дашков Д.В.	639
ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД В КАРСКОМ МОРЕ: РОЛЬ ФИТО- И ЗООПЛАНКТОНА <u>Сергеева В.М.</u> , Карманов В.А., Дриц А.В., Беляев Н.А., Кравчишина М.Д., Булохов А.В.	643
Приложение	649
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА I (IV)	650
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА II (IV)	657
СОДЕРЖАНИЕ ТОМА IV (IV)	662