



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ
ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН**

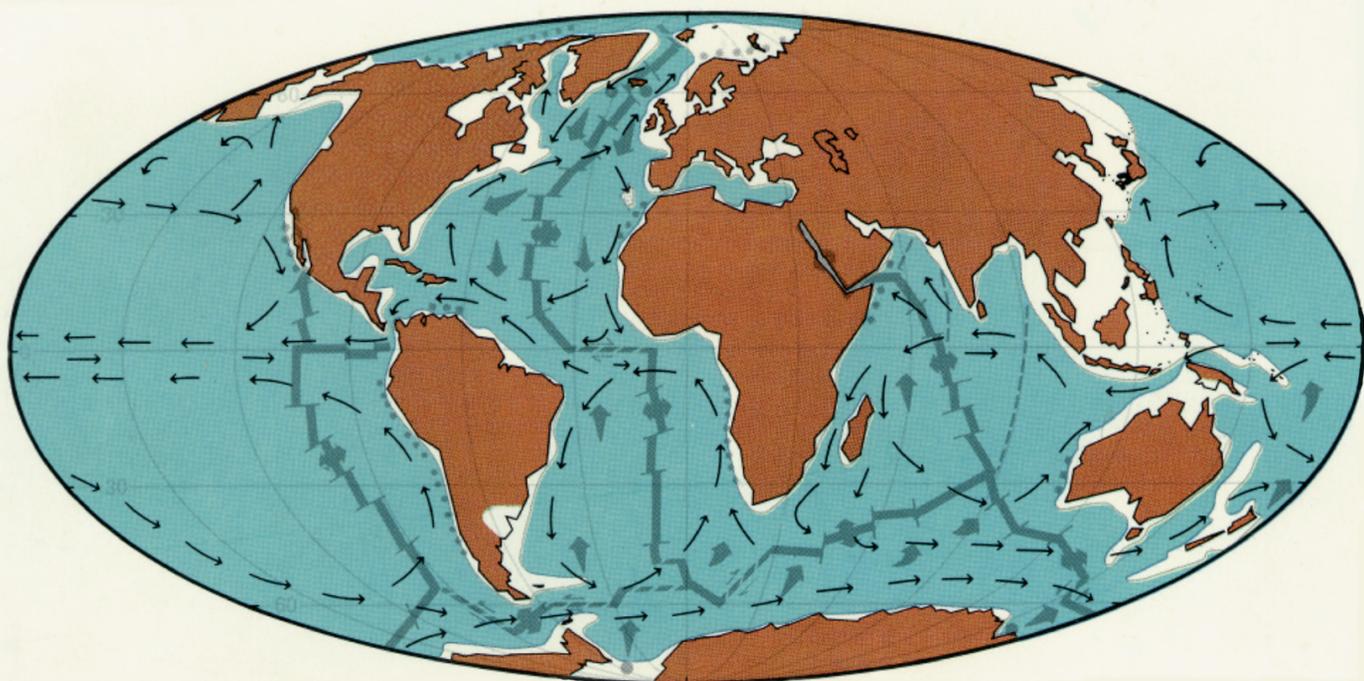


**Материалы
XXVI
Международной
научной
конференции
(Школы)
по морской
геологии**

**Москва
2025**

ГЕОЛОГИЯ МОРЕЙ И ОКЕАНОВ

Том I



*РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ ИМ. П.П. ШИРШОВА РАН*

**ГЕОЛОГИЯ
МОРЕЙ И ОКЕАНОВ**

**Материалы XXVI Международной научной конференции
(Школы) по морской геологии**

Москва, 17–21 ноября 2025 г.

Том I

**GEOLOGY
OF SEAS AND OCEANS**

**Proceedings of XXVI International Conference on Marine
Geology**

Moscow, November 17–21, 2025

Volume I

Москва / Moscow
ИО РАН / IO RAS
2025

ББК 26.221
Г35
УДК 551.35

Геология морей и океанов: Материалы XXVI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. – М.: ИО РАН, 2025. – 304 с.

В настоящем издании представлены доклады морских геологов, геофизиков, геохимиков и других специалистов на XXVI Международной научной конференции (Школе) по морской геологии, опубликованные в четырех томах.

В томе I рассмотрены проблемы изучения полярных регионов, а также гидротерм, руд, полезных ископаемых океанов и морей.

ISBN 978-5-6051054-7-3

DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-7-3>

Доклады опубликованы в авторской редакции.

Ответственный редактор к.г.-м.н. Н.В. Политова

Рецензенты

академик Л.И. Лобковский, д.г.-м.н. М.А. Левитан,
д.г.-м.н. А.Е. Рыбалко, д.г.-м.н. А.Ю. Леин, к.г.-м.н. М.Д.
Кравчишина

Geology of seas and oceans: Proceedings of XXVI International Conference on Marine Geology. Vol. I. – Moscow: IO RAS, 2025. – 304 pp.

The reports of marine geologists, geophysicists, geochemists and other specialists of marine science at XXVI International Conference on Marine Geology in Moscow are published in four volumes.

Volume I includes reports devoted to the problems of research of polar regions, and also of hydrothermal systems, ores, mineral resources in the seas and oceans.

ISBN 978-5-6051054-7-3
ББК 26.221

© ИО РАН 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

<i>Алёхина Г.Н., Политова Н.В.</i> Юбиляры Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2024–2025 годы	15
Морская геология Арктики и Антарктики	
<i>Аветян С.Г., Якимова К.С., Новичкова Е.А., Козина Н.В.</i> Гранулометрический состав поверхностного слоя донных осадков Гренландского моря	28
<i>Алексеева Т.Н., Булохов А.В.</i> Гранулометрический состав поверхностных осадков севера Баренцева моря и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана	33
<i>Алешина К.Ф., Никишин А.М., Татаринов В.Ю., Родина Е.А.</i> Структура и развитие коры ультрамедленного спрединга в Евразийском бассейне	38
<i>Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г., Черных Д.В.</i> Проявления дегазации в верхней осадочной толще и рельефе дна юго-восточной части моря Лаптевых	43
<i>Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В., Казанин А.Г.</i> Новая информация о субаквальной мерзлоте, газогидратах и взрывной дегазации Земли на шельфе и суше Арктики	47
<i>Вазюля С.В., Дерягин Д.Н., Павлова М.А., Кравчишина М.Д., Реджепова З.Ю.</i> Алгоритм оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутникового сканера MODIS	52
<i>Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С.</i> Карта субаквальной мерзлоты Баренцева и Карского морей	57
<i>Вержбицкий В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И., Малышев Н.А.</i> Геология острова Врангеля – ключ к пониманию эволюции шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей	62
<i>Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И.</i> Криолитозона поднятия Де Лонга (шельф Восточно-Сибирского моря) по данным численного моделирования	66
<i>Горбарев А.А.</i> Икаит в донных осадках Чукотского моря: современное состояние изученности	71
<i>Григорьев А.Г., Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М., Рябчук Д.В., Нестерова Е.Н., Невин И.А.</i> Предварительные	76

результаты литолого-геохимического изучения грунтовых колонок, отобранных в Беринговом проливе <i>Гусев Е.А., Окунев А.С., Бердинских Д.В., Крылов А.А., Элькина Д.В., Хоснуллина Т.И., Семенов П.Б., Захаров В.Ю.</i>	81
Морские голоценовые осадки Шпицбергена и окружающего шельфа <i>Дара О.М., Козина Н.В.</i> Первый опыт эксплуатации нового портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай) в условиях морской экспедиции	85
<i>Дара О.М., Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С., Новичкова Е.А., Терновой Д.А.</i> Новые данные об икаитах в морях Арктики	90
<i>Даувальтер В.А., Адамская П.Н., Банникова Ю.М., Слукровский З.И., Елизарова И.Р.</i> Геохимия поверхностных вод острова Кильдин, Мурманская область	95
<i>Демина Л.Л., Алексеева Т.Н., Булохов А.В.</i> О связи элементного и гранулометрического состава в поверхностных осадках Баренцева моря	100
<i>Доронин Д.О., Ноговицын Д.Д., Доронина А.В.</i> Актуальные вопросы метрологического обеспечения добычи россыпей ископаемых остатков мамонтовой фауны на шельфе Арктики	106
<i>Друщиц В.А.</i> Предпосылки формирования четвертичных газовых месторождений на континентальных окраинах Арктики	109
<i>Дубинина Е.О., Косова С.А., Чижова Ю.Н., Авдеенко А.С.</i> Изотопные параметры ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) и соленость поверхностного слоя морских вод в полярных регионах: динамическая модель и ее верификация на примере морей Восточной и Европейской Арктики	114
<i>Дунаев Н.Н., Кузнецов М.А.</i> Морские берега острова Десепшен (Антарктика)	119
<i>Иванов В.В., Щука А.С., Ковалев Г.А., Амбросимов А.К., Дроздова А.Н., Лукьянова О.А., Артамонова К.В., Калинин М.А., Новигатский А.Н., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д.</i> Термохалинная структура и циркуляция вод в северных краевых шельфовых желобах Баренцева и Карского морей	124

летом 2024 года	
<i>Иванов М.В., Алаторцев А.В., Аксентов К.И.</i> Распределение ртути в донных осадках восточной Арктики	129
<i>Козина Н.В., Матуль А.Г., Баранов Б.В., Цуканов Н.В., Якимова К.С., Сломнюк С.В., Володин В.Д., Драздова А.В., Козлов А.А., Кравчишина М.Д.</i> Литолого-геохимические и микропалеонтологические исследования донных осадков Баренцева и Карского морей в 93-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»	134
<i>Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Дара О.М., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С.</i> Новые данные о железомарганцевых и карбонатных конкрециях в донных отложениях Карского моря (район Ленинградского газоконденсатного месторождения)	139
<i>Кособокова К.Н.</i> Резиденты и экспатрианты в планктоне Арктического Бассейна: распространение, роль в структуре сообществ и продуктивности	144
<i>Кособокова К.Н., Залота А.К.</i> Размерная структура популяции каляноидного копепода <i>Calanus glacialis</i> в Белом море	149
<i>Крылов А.А., Каминский Д.В., Пилицын А.Г., Покровский Б.Г., Чамов Н.П., Татаринев В.Ю., Рогова И.В., Семенов П.Б., Аксенов А.О., Гусев Е.А., Киль А.О., Лодочникова А.С., Шатрова Е.В., Хлыстов О.М., Ахманов Г.Г.</i> Фокусированная разгрузка углеводородных флюидов в области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых	153
<i>Лейченков Г.Л., Гусева Ю.Б., Сергеева В.М.</i> Тектоническое строение и эволюция земной коры антарктического сектора Тихого океана	157
<i>Маслов А.В., Стародымова Д.П., Мигдисова И.А., Козина Н.В., Новичкова Е.А., Алексеева Т.Н., Шевченко В.П.</i> У-РЗЭ систематика алевропитово-пелитовых и пелитовых илов юго- запада Карского моря	161
<i>Мещеряков Н.И., Усягина И.С., Ананьев Р.А., Сорохтин Н.О., Иванова Н.С., Кокин О.В.</i> Геохронологические исследования донных отложений пролива Вилькицкого в 56-м рейсе НИС	166

«Академик Николай Страхов»	
<i>Нечаев С.Ю., Овсяченко А.Н.</i> Таинственный остров Скобка на древних лощих Печорского моря как возможный маркер сильнейшего сейсмического события	171
<i>Никишин А.М., Алешина К.Ф., Родина Е.А., Татаринов В.Ю.</i> Новая модель геологической истории Арктического океана	176
<i>Никишин А.М., Хлебникова О.А., Татаринов В.Ю., Пилицын А.Г., Алешина К.Ф.</i> Зона сочленения хребта Гаккеля и шельфа моря Лаптевых по данным батиметрии и сейсморазведки	180
<i>Овсеян Е.А., Захарова А.А., Митрофанова Н.О., Овсеян Я.С., Зенина М.А.</i> Влияние речного стока на видовой состав сообществ и сохранность раковин бентосных фораминифер в Восточно-Сибирском море	188
<i>Пискарев А.Л., Табырца С.Н., Дергилева Е.А., Киреев А.А., Поселов В.А., Элькина Д.В., Безумов Д.В.</i> Этапы формирования земной коры центральной области Евразийского бассейна	192
<i>Правикова Н.В., Жарков А.Д., Коротаев М.В., Чиждова Е.Р., Алешина К.Ф., Никишин А.М.</i> Кинематическая реконструкция композитного профиля Канадского бассейна	197
<i>Родина Е.А., Никишин А.М., Алешина К.Ф., Бакирова С.А., Посаментьер Х.У.</i> Карбонатные постройки и тектоностратиграфия поднятия Менделеева (Арктический океан)	202
<i>Рубан А.С., Дударев О.В.</i> Изотопный состав серы аутигенного пирита моря Лаптевых: влияние разгрузки метана	207
<i>Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Лукманов Р.А.</i> Скорости аккумуляции донных осадков Карского моря и моря Лаптевых	211
<i>Силантьев С.А.</i> Неогеновая активизация большой магматической провинции HALIP: пример архипелага Де Лонга, Восточная Арктика	216
<i>Сломнюк С.В., Новичкова Е.А., Якимова К.С., Матуль А.Г., Кравчишина М.Д., Мохан Р., Тивари М.</i> Изменения скоростей осадконакопления осадков района контуритового дрефта (юго-западная часть Карского моря) в голоцене	221

<i>Токарев М.Ю., Терехина Я.Е., Пирогова А.С., Потемка А.К., Росляков А.Г.</i>	226
Технологии сейсмических исследований опасных геологических процессов в Арктике	
<i>Уголькова Е.А., Гершелис Е.В., Дударев О.В., Семилетов И.П.</i>	231
Особенности геохимического состава донных осадков на шельфе Сибирской Арктики	
<i>Чаркин А.Н., Кособокова К.Н., Ершова Е.А., Семин В.Л., Семкин П.Ю., Колбасова Г.Д., Дударев О.В., Леусов А.Э., Гуленко Т.А., Старцев А.М., Красиков В.А., Файман П.А., Ульяновцев А.С., Зверев С.А., Бессонова Е.А., Юрикова Д.А.</i>	236
Тепловодный «оазис жизни» Чаунской губы (Восточно-Сибирского море): причины возникновения и существования	
<i>Элькина Д.В., Пискарев А.Л., Гусев Е.А., Баженова И.Д., Гагаев А.С., Гетман К.В., Овсянникова Е.С., Попова Е.А., Хоснуллина Т.И.</i>	238
Источники и скорость четвертичного осадконакопления в Арктическом бассейне по результатам корреляции значений магнитной восприимчивости в колонках донных осадков, отобранных в рейсе СП-42	

Симпозиум им. П.Л. Безрукова «Полезные ископаемые Мирового океана, гидротермы на дне океанов и морей»

<i>Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С.</i>	243
Стратегические металлы в позднеголоценовых донных отложениях окраинных морей северо-востока Азии	
<i>Бережная Е.Д., Шадрин Д.А., Римская-Корсакова М.Н., Дубинин А.В.</i>	248
Распределение РЗЭ между отдельными фазами осадков Бразильской котловины	
<i>Ваништейн Б.Г., Верещака С.А., Ткаченко Г.Г., Лодочникова А.С.</i>	252
Комплексные газогидрогеохимические исследования на западном шельфе Азовского моря	
<i>Дунаев Н.Н.</i>	255
К проблеме поиска и оценке запасов песка на Анапском шельфе	
<i>Забанбарк Алие</i>	260
Углеводородный потенциал основных осадочных бассейнов на континентальной окраине Юго-Восточной Африки	
<i>Колесник О.Н., Колесник А.Н., Карабцов А.А., Съедин В.Т.,</i>	264

<i>Рашидов В.А., Долгая А.А., Азаров И.В., Максеев Д.С.</i> Никель в рудных корках Охотского моря	
<i>Лыгина Т.И., Миноранский Д.Е., Пономарева И.Н.</i> Подготовка Российского разведочного района железомарганцевых конкреций к освоению: результаты разведочных работ	266
<i>Лысенко В.И.</i> Своеобразие многокомпонентного состава флюидов холодных сипов бухты Ласпи (Южный берег Крыма)	271
<i>Люткевич А.Д., Сахаров Б.А., Дара О.М., Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Кулаженок М.Н.</i> Смешанослойные глинистые минералы осадков гидротермального поля Пюи де Фоль (САХ)	276
<i>Мальцева К.П., Петров В.А.</i> Влияние гидротермальной активности на петрографо-геохимические характеристики базальтов (16°–21° САХ)	281
<i>Мелекесцева И.Ю.</i> Гидротермальные сульфидные поля, связанные с внутриокеаническими комплексами: возможная типизация	286
<i>Пертяжко И.С., Савина Е.А.</i> Геохимия гидrogenных кобальтобогатых Fe-Mn корок Магеллановых гор, Тихий океан	291
<i>Петров В.А., Судариков С.М., Токарев И.В., Наркевский Е.В., Мальцева К.П.</i> Изотопный состав кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) в придонных водах Российского разведочного района Срединно-Атлантического хребта (17°08.6' с.ш.)	296
<i>Федоров Н.Н., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д.</i> Построение прогнозных ореолов выпадения минеральных частиц гидротермального происхождения на океаническое дно по данным автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий	299

CONTENTS

<i>Alekhhina G.A., Politova N.V.</i> Persons of P.P. Shirshov Institute of Oceanology whose anniversary were celebrated in 2024–2025	15
Marine geology of the Arctic and Antarctic regions	
<i>Avetian S.G., Iakimova K.S., Novichkova E.A., Kozina N.V.</i> Grain size distribution of surface sediments in the Greenland Sea	28
<i>Alekseeva T.N., Bulokhov A.V.</i> Granulometric composition of the surface sediments of the North Barents Sea and adjacent area of the Arctic Ocean	33
<i>Aleshina K.F., Nikishin A.M., Tatarinov V.Yu., Rodina E.A.</i> Structure and evolution of the ultra-slow spreading crust in the Eurasian basin	38
<i>Ananiev R.A., Dmitrevsky N.N., Roslyakov A.G., Chernykh D.V.</i> Manifestations of degassing in the upper sedimentary strata and seabed relief of the SE Laptev Sea	43
<i>Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kishankov A.V., Kazanin A.G.</i> New information on subaqueous permafrost, gas hydrates and explosive degassing of the Earth on shelf and on land of the Arctic	47
<i>Vazyulya S.V., Deryagin D.N., Pavlova M.A., Kravchishina M.D., Redzhepova Z.U.</i> Algorithm for estimating suspended matter concentration in the Laptev Sea using MODIS data	52
<i>Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Shirokov R.S.</i> Submarine Permafrost Map of Barents and Kara Seas	57
<i>Verzhbitskiy V.E., Sokolov S.D., Tuchkova M.I., Malyshev N.A.</i> Geology of Wrangel Island – a key for understanding of evolution of East Siberian and Chukchi Sea shelf	62
<i>Gavrilov A.V., Malakhova V.V., Pizhankova E.I.</i> Cryolithozone of the De Long Rise (shelf of the East Siberian Sea) based on numerical modeling data	66
<i>Gorbarev A.A.</i> Ikaite in bottom sediments of the Chukchi Sea: a current state of knowledge	71

<i>Grigoriev A.G., Zhamoida V.A., Sergeev A.Yu., Budanov L.M., Ryabchuk D.V., Nesterova E.N., Neevin I.A.</i>	76
Preliminary results of lithological and geochemical studies of sediment cores collected in the Bering Strait	
<i>Gusev E.A., Okunev A.S., Berdinskikh D.V., Krylov A.A., Elkina D.V., Khosnullina T.I., Semenov P.B., Zakharov V.Yu.</i>	81
Holocene marine sediments of Spitsbergen and adjacent shelf	
<i>Dara O.M., Kozina N.V.</i> First experience using the new portable X-ray diffractometer SHANE LAN Scientific (China) in a marine expedition	85
<i>Dara O.M., Kozina N.V., Kravchishina M.D., Filippov A.S., Novichkova E.A., Ternovoy D.A.</i> New data on ikaites in the Arctic seas	90
<i>Dauvalter V.A., Adamskaya P.N., Bannikova Yu.M., Shukovski Z.I., Elizarova I.R.</i> Geochemistry of surface waters of Island Kildin, Murmansk Region	95
<i>Demina L.L., Alekseeva T.N., Bulokhov A.V.</i> On the relationship between elemental and grain-size composition of the Barents Sea surface sediments	100
<i>Doronin D.O., Nogovitsyn D.D., Doronina A.V.</i> Current issues of metrological support for the extraction of placers of fossil remains of mammoth fauna on the Arctic shelf	106
<i>Drouchits V.A.</i> Prerequisites for the formation of Quaternary gas fields on the Arctic continental margins	109
<i>Dubinina E.O., Kossova S.A., Chizhova Yu.N., Avdeenko A.S.</i> Isotope signature and salinity of marine surface waters in polar regions: a dynamic model and its verification for seawaters of East and European Arctic	114
<i>Dunaev N.N., Kuznetsov M.A.</i> The seashores of Deception Island (Antarctica)	119
<i>Ivanov V.V., Schuka A.S., Kovalev G.A., Ambrosimov A.K., Drozdova A.N., Lukianova O.A., Artamonova K.V., Kalinin M.A., Novigatskiy A.N., Kluvitkin A.A., Kravchishina M.D.</i> Thermohaline structure and circulation in the northern marginal shelf troughs of the Barents and Kara seas in summer 2024.	124

<i>Ivanov M.V., Alatorsev A.V., Aksentov K.I.</i> Distribution of mercury in bottom sediments in the eastern sector of the Arctic	129
<i>Kozina N.V., Matul A.G., Baranov B.V., Tsukanov N.V., Yakimova K.S., Slomnyuk S.V., Volodin V.D., Drazdova A.V., Kozlov A.A., Kravchishina M.D.</i> Multidisciplinary geological studies of the bottom sediments of the Barents and Kara Seas during the 93rd cruise of the R/V "Akademik Mstislav Keldysh"	134
<i>Kozina N.V., Reykhard L.Ye., Dara O.M., Kravchishina M.D., Filippov A.S.</i> New data on iron-manganese and carbonate concretions in the bottom sediments of the Kara Sea (the Leningradskoye gas condensate field area)	139
<i>Kosobokova K.N.</i> Residents and expatriates in the plankton of the Arctic Basin: distribution, role in community structure and contribution to productivity	144
<i>Kosobokova K.N., Zalota A.K.</i> Size structure of the White Sea population of calanoid copepod <i>Calanus glacialis</i>	149
<i>Krylov A.A., Kaminsky D.V., Pilitsyn A.G., Pokrovsky B.G., Chamov N.P., Tatarinov V.Yu., Rogova I.V., Semenov P.B., Aksenov A.O., Gusev E.A., Kil A.O., Lodochnikova A.S., Shatrova E.V., Khlystov O.M., Akhmanov G.</i> Focusing discharge of hydrocarbon fluids at the area of connection the Gakkel Ridge with the Laptev Sea shelf	153
<i>Leitchenkov G.L., Guseva Ju.B., Sergeeva V.M.</i> Tectonic Structure and crustal evolution of the southernmost Pacific Ocean, Antarctica	157
<i>Maslov A.V., Starodymova D.P., Migdisova I.A., Kozina N.V., Novichkova E.A., Alekseeva T.N., Shevchenko V.P.</i> Y-REE systematics of silty-pelitic and pelitic sediments in the Southwestern Kara Sea	161
<i>Meshcheriakov N.I., Usyagina I.S., Ananyev R.A., Sorokhtin N.O., Ivanova N.S., Kokin O.V.</i> Geochronological studies of bottom sediments in the Vilkitsky Strait during the 56th cruise of the R/V «Akademik Nikolay Strakhov»	166
<i>Nechaev S.Yu., Ovsyuchenko A.N.</i> The mysterious Skobka	171

(Clamp) Island on ancient sailing directions of the Pechora Sea as a possible marker of the strongest seismic event	
<i>Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A., Tatarinov V.Yu.</i>	176
new model of the geological history of the Arctic Ocean	
<i>Nikishin A.M., Khlebnikova O.A., Tatarinov V.Yu., Pilitsin A.G., Aleshina K.F.</i>	180
The junction zone between the Gakkel Ridge and the Laptev Sea shelf according to bathymetry and seismic survey data	
<i>Ovsepyan E.A., Zakharova A.A., Mitrofanova N.O., Ovsepyan Ya.S., Zenina M.A.</i>	188
Influence of riverine discharge on species composition and preservation of benthic foraminiferal tests in the East Siberian Sea	
<i>Piskarev A.L., Tabyrtsa S.N., Dergileva E.A., Kireev A.A., Poselov V.A., Elkina D.V., Bezumov D.V.</i>	192
Stages of the Earth's Crust Formation in the Central Region of the Eurasian Basin	
<i>Pravikova N.V., Zharkov A.D., Korotaev M.V., Chizhova E.R., Aleshina K.F., Nikishin A.M.</i>	197
Kinematic Restoration of Composite Profile in Canada Basin	
<i>Rodina E.A., Nikishin A.M., Aleshina K.F., Bakirova S.A., Posamentier H.W.</i>	202
Carbonate buildups and Tectonostratigraphy of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean)	
<i>Ruban A.S., Dudarev O.V.</i>	207
Sulfur isotopic composition of authigenic pyrite from the Laptev Sea: influence of methane seepage	
<i>Rusakov V.Y., Kuz'mina T.G., Lukmanov R.A.</i>	211
Sediment accumulation rates of the Kara and Laptev Seas	
<i>Silantyev S.A.</i>	216
Neogene magmatic events in HALIP: Example of De Long Archipelago, Eastern Arctic	
<i>Slomnyuk S.V., Novichkova E.A., Yakimova K.S., Matul A.G., Kravchishina M.D., Mohan R., Tiwari M.</i>	221
The sedimentation rate changes in the contoured drift deposits (southwestern Kara Sea) during the Holocene	
<i>Tokarev M.Y., Terekhina Ya.E., Pirogova A.S., Potemka A.K., Roslyakov A.G.</i>	226
Technologies for seismic research of Arctic geohazards	

<i>Ugol'kova E.A., Gershelis E.V., Dudarev O.V., Semiletov I.P.</i>	231
Features of the geochemical composition of bottom sediments on the shelf of the Siberian Arctic	
<i>Charkin A.N., Kosobokova K.N., Ershova E.A., Syomin V.L., Semkin P.Yu., Kolbasova G.D., Dudarev O.V., Leusov A.E., Gulenko T.A., Startsev A.M., Krasikov V.A., Fayman P.A., Ulyantsev A.S., Zverev S.A., Bessonova E.A., Yurikova D.A.</i>	236
Warm-water "oasis of life" of Chaunskaya Bay (East Siberian Sea): reasons for its emergence and existence	
<i>Elkina D.V., Piskarev A.L., Gusev E.A., Bazhenova I.D., Gagaev A.S., Getman K.V., Ovsyannikova E.S., Popova E.A., Khosnullina T.I.</i>	238
Sources and rate of Quaternary sedimentation in the Arctic Basin based on the results of the correlation of magnetic susceptibility values in the cores of the sea floor sediments, NP-42 cruise	
P.L. Bezrukov memorial symposium "Mineral resources of the World Ocean, hydrotherms on the bottom of the seas and oceans"	
<i>Aksentov K.I., Sattarova V.V., Astakhov A.S.</i>	243
Strategic metals in late Holocene bottom sediments of the marginal seas of northeast Asia	
<i>Berezhnaya E.D., Shadrina D.A., Rimskaya-Korsakova M.N., Dubinin A.V.</i>	248
Distribution of Rare Earth Elements (REE) between phases in sediments of the Brazil Basin	
<i>Vanshtein B.G., Vereshchaka S.A., Tkachenko G.G., Lodochnikova A.S.</i>	252
Comprehensive gas-hydrogeochemical studies on the western shelf of the Sea of Azov	
<i>Dunaev N.N.</i>	255
On the Issue of Sand Resource Exploration and Assessment on the Anapa Shelf	
<i>Zabanbark Alie</i>	260
Hydrocarbon potential of the principal sedimentary basins on the continental margin of South-East Africa	
<i>Kolesnik O.N., Kolesnik A.N., Karabtsov A.A., S'edin V.T., Rashidov V.A., Dolgaya A.A., Azarov I.V., Makseev D.S.</i>	264
Nickel in ore crusts of the Sea of Okhotsk	

<i>Lygina T., Minoranskiy D., Ponomareva I.N.</i> Preparation of the Russian Exploration Area of Polymetallic Nodules for Development: Exploration Results	266
<i>Lysenko V.I.</i> The uniqueness of the multicomponent composition of cold seep fluids in Laspi Bay (South Coast of Crimea)	271
<i>Lyutkevich A.D., Sakharov B.A., Dara O.M., Gablina I.F., Dobretsova I.G., Kulazhenok M.N.</i> Mixed-layered clay minerals from sediments of the Puy de Folles hydrothermal field (MAR)	276
<i>Maltceva K.P., Petrov V.A.</i> Impact of hydrothermal activity on the petrographic–geochemical features of basalts (16°–21° MAR)	281
<i>Melekestseva I.Yu.</i> Hydrothermal sulfide fields related to oceanic core complexes: a possible classification	286
<i>Peretyazhko I.S., Savina E.A.</i> Geochemistry of hydrogenic Cobalt-rich Fe-Mn crusts of the Magellan Seamounts, Pacific Ocean	291
<i>Petrov V.A., Sudarikov S.M., Tokarev I.V., Narkevsky E.V., Maltceva K.P.</i> Isotopic composition of oxygen and hydrogen ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) in the bottom waters of the Russian Exploration Area of the Mid-Atlantic Ridge (17°08.6' N)	296
<i>Fedorov N.N., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D.</i> Construction of predictive halos for the fallout of hydrothermal mineral particles onto the ocean floor based on data from automatic deep-water sedimentary observatories	299

Алехина Г.Н., Политова Н.В.

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

Юбилеры Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2024–2025 годы

Мы отметили юбилейные даты ученых Института океанологии из славной плеяды российских исследователей, чей вклад в развитие океанологии и морской геологии составляет ее славу.



135 лет

ЗЕНКЕВИЧ ЛЕВ АЛЕКСАНДРОВИЧ (1889–1970), один из основателей Института, академик, лауреат Государственной и Ленинской премий, общепризнанный глава советской океанологической биологической школы.

130 лет

БРУЕВИЧ СЕМЕН ВЛАДИМИРОВИЧ (1894–1971), биогидрохимик, доктор химических наук, работавший в Институте со дня его основания. В 1949 г. он возглавил первый рейс "Витязя" в Черном море, за что был удостоен звания Лауреата Государственной премии. Профессор, заслуженный деятель науки РСФСР, с 1946 по 1965 гг. – заведующий Химическим отделом. Автор более 200 опубликованных научных работ.



ПАПАНИН ИВАН ДМИТРИЕВИЧ (1894–1986) доктор географических наук, контр-адмирал, дважды Герой Советского Союза. Был приглашен академиком П.П. Ширшовым в Институт океанологии на пост заместителя директора Института по экспедициям в 1948 г., был руководителем первой советской дрейфующей станции СП-1 (1937–1938), начальником Главсевморпути (1939–1946), начальником Отдела морских экспедиционных работ АН СССР (с 1951). Перед ним стояли две основные задачи: успешно закончить переоборудование судна «Витязь» и найти и перестроить здание для Института в Москве. По его инициативе и с его деятельной помощью было принято решение СМ СССР о проектировании и строительстве серии научно-исследовательских судов из семи единиц. Первое судно этой серии – «Академик Курчатов», было передано Институту океанологии в 1966 г.



120 лет

БОГОРОВ ВЕНИАМИН ГРИГОРЬЕВИЧ (1904–1971), биоокеанолог, доктор биологических наук, член-

корреспондент АН СССР, лауреат Государственной премии, лауреат Ломоносовской премии, один из основателей Института. Студентом участвовал в плаваниях "Персея" в Баренцевом море, а затем, став аспирантом Плавморнина, – в Карском море. В 1943 г. был назначен заместителем Лаборатории океанологии. В 1946 г. эта лаборатория была преобразована в Институт океанологии. Возглавлял несколько первых рейсов "Витязя" в дальневосточные моря, а затем – его большие океанские рейсы в Тихий и Индийский океаны. Его труд был отмечен высокими правительственными наградами: орденом Ленина, орденом Красной Звезды, дважды – орденом Трудового Красного Знамени, медалями.



ЖУЗЕ АНАСТАСИЯ ПАНТЕЛЕЙМОНОВНА (1905–1981), микропалеонтолог, доктор географических наук, лауреат Государственной премии. Была Председателем секции по морской микропалеонтологии при Океанографической комиссии АН СССР, председателем комиссии по водорослям в Научном Совете, инициатором и одним из организаторов периодически действующего с 1967 г. Международного симпозиума "Современные и ископаемые диатомовые водоросли". С 1951 г. работала в

Отделе геологии океана Института. Опубликовала 6 монографий, более 100 научных работ. Ею было описано более 10 новых родов и более 100 новых видов диатомей, один из родов назван в честь А.П. Лисицына *Lisitzinia* Jouse, 1978. Многие новые таксоны микроископаемых были названы советскими и зарубежными микропалеонтологами в ее честь.

ШИРШОВ ПЕТР ПЕТРОВИЧ (1905–1953), основатель и первый директор Института океанологии АН СССР, гидролог, доктор географических наук, академик, Герой Советского Союза. Участник экспедиций на ледоколах «Сибиряков», «Челюскин», «Красин»; участник дрейфа СП-1. Был заместителем начальника Главсевморпути; директором ААНИИ; уполномоченным Государственного комитета обороны; Министром Морского флота СССР. Награжден 3 орденами Ленина, 2 орденами Трудового Красного Знамени, Орденом Красной Звезды и медалями.



115 лет



БЕЗРУКОВ ПАНТЕЛЕЙМОН ЛЕОНИДОВИЧ (1909–1981), член-корреспондент АН СССР, трижды лауреат Государственной премии СССР. Работал в Институте с 1946 г., где возглавлял Отдел геологии моря. Изданная в 1976 г. первая в мире фундаментальная монография о железо-марганцевых конкрециях «Железо-марганцевые конкреции Тихого океана» подвела итоги исследований

1968–1973 гг. в Тихом и Индийском океанах.



ЗЕНКОВИЧ СЕВОВОЛОД ПАВЛОВИЧ (1910–1994),

геолог, геоморфолог, доктор географических наук, профессор, лауреат Ленинской и Государственной премий, один из основателей Института океанологии. В 1944 г. академик П.П. Ширшов пригласил его для участия в создании Института океанологии, в течение 1944–1946 гг. им был создан сначала Геологический отдел, а впоследствии – Лаборатория морфологии и динамики

морских берегов. 25 лет руководил Береговой секцией Океанографической комиссии при Президиуме АН СССР (ныне рабочая группа «Морские берега» Комиссии по проблемам Мирового океана). За заслуги в науке награжден многочисленными орденами и медалями, в том числе КНР, Вьетнама, Болгарии, Египта.

ЛОНГИНОВ ВЛАДИМИР ВИТАЛЬЕВИЧ (1909–1989),

доктор географических наук, профессор. В честь 100-летия со дня его рождения с 14 по 17 сентября 2009 г. в Институте океанологии была проведена международная конференция «Литодинамика донной контактной зоны океана». Был членом бюро Океанографической комиссии АН СССР, а с 1978 г. бессменно руководил Рабочей группой «Литодинамика океана» в составе Комиссии по проблемам Мирового океана.



ОСТРОУМОВ ЭСПЕР АЛЕКСАНДРОВИЧ (1909–1990),

доктор химических наук, профессор. В Институте океанологии АН СССР начал работу с 1949 г. руководителем химической группы Отдела морских отложений, создал первый трансокеанский литолого-геохимический профиль осадков Тихого океана. Результатом явилась двухтомная монография "Литология и геохимия осадков Тихого океана" и "Геохимия диагенеза

осадков Тихого океана".

СЫСОВЕВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ (1909–1964),

инженер-океанолог, канд.тех.наук, лауреат Государственной премии. Один из основателей Института океанологии. Им проведена большая работа по сохранению Института после смерти П.П. Ширшова. Руководил работами по техническому переоборудованию судна «Марс-Экватор» в НИС "Витязь". С помощью разработанной им совместно с Е.И. Кудиновым

глубоководной гидростатической трубки удалось получить рекордную по длине колонку 33.5 м. Им проведены первые в стране исследования по сейсмике морского дна, создан уникальный комплекс приборов для



гидрооптических исследований.



ШТОКМАН ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ (1909–1968), океанолог, доктор физико-математических наук, профессор. Начиная с 1946 г., вся его жизнь была связана с Институтом океанологии АН СССР, где он возглавлял Отдел физической океанологии, а затем Лабораторию динамики моря. Основной круг его научных интересов в ИОАН – морские течения и процессы перемешивания водных масс океана. Его именем названо научно-исследовательское судно ИО

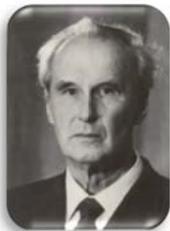
РАН «Профессор Штокман», в рейсе которого в 1988 г. было открыто газоконденсатное месторождение, названное по имени корабля – Штокманским.

110 лет

ГЕОДЕКЯН АРТЕМ АРАМОВИЧ (1914–1997), доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент РАН. В Институте работал с 1967 г. и занимался исследованием нефтегазоносности акваторий. Был заместителем директора Института, руководил лабораторией, а затем и Отделом нефтегазоносности Мирового океана. Автор более 200 научных трудов. Награжден орденами Трудового Красного Знамени, Дружбы народов, многими медалями. Удостоен звания «Почетный нефтяник».



ЖИВАГО АЛЕКСАНДР ВАСИЛЬЕВИЧ (1914–2009), доктор географических наук, профессор, лауреат Государственной премии. Один из отечественных ученых, трудами которых создана морская геоморфология. Участвовал в первом (1949 г.) рейсе «Витязя», в первых Советских Антарктических экспедициях дизель-электрохода «Обь» (1955–1958).



105 лет

ГЕРШАНОВИЧ ДАВИД ЕФИМОВИЧ (1920–2007), геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Заслуженный деятель науки. Участник многочисленных экспедиций на судах ИОАН. В Институте океанологии работал с 1986 по 2005 гг. Участник Великой Отечественной войны. Внес большой вклад в изучение рельефа дна и грунтов в промысловых районах Мирового океана. Один из первых начал исследования подводных гор как наиболее продуктивных участков Мирового океана и перспективных районов промысла.



100 лет



САИДОВА ХАДЫЖАТ МАГОМЕДОВНА (1925–2022), геолог, доктор биологических наук, профессор. В Институте океанологии работала с 1952 г. Её исследования охватывают проблемы систематики, экологии и биогеографии современных бентосных фораминифер, экостратиграфии и палеоокеанологии. Ею было опубликовано 140 научных работ и 6 монографий.

СКОРНЯКОВА НАДЕЖДА СЕРГЕЕВНА (1924–1995), геолог, доктор геолого-минералогических наук. Ей принадлежит первое в мире обобщение по распределению железа и марганца в донных осадках Тихого океана, открытие обогащенных железом металлоносных осадков гидротермального генезиса. Она была автором более 170 научных работ и соавтор трех коллективных монографий.



95 лет



АЙБУЛАТОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ (1930–2007), доктор географических наук, профессор, Заслуженный эколог России, с 1987 по 2005 гг. – заведующий Лабораторией шельфа и морских берегов им. В.П. Зенковича. Занимался разработкой методов океанологических исследований с помощью гипербарических лабораторий («Черномор», «Спрут») и обитаемых подводных аппаратов («Аргус», «Пайсис»), руководил и непосредственно участвовал в подводных

экспериментах по длительному пребыванию человека под водой в гипербарических устройствах. Создатель отдельной отрасли науки – геоэкологии моря. Его имя носит одна из секций Международной научной конференции (Школы) по морской геологии.

БАТУРИН ГЛЕБ НИКОЛАЕВИЧ (1930–2020), геолог, доктор геолого-минералогических наук. В 1968 г. в гидрофизической экспедиции в юго-восточной Атлантике и зоне Бенгальского апвеллинга на шельфе Намибии им были подняты на борт, наряду с ураноносными осадками и костными брекчиями, нелитифицированные фосфатные стяжения – первые обнаруженные в океане современные фосфориты, возможность существования которых некоторые ученые отрицали принципиально.



ЗОНЕНШАЙН ЛЕВ ПАВЛОВИЧ (1929–1992), доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, профессор. С 1974 г.



работал в Институте океанологии в качестве заведующего Лабораторией палеогеодинамики. Изучал неотектонику морского дна, был лидером отечественного неомобилизма. Участник многочисленных океанских экспедиций и погружений на глубоководных обитаемых аппаратах. Его имя носит одна из секций Международной научной конференции (Школы) по морской геологии.

КАЗМИН ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ (1930–2010), доктор геолого-минералогических наук. С 1981 г. работал в Институте океанологии, с 1987 по 2002 гг. был заведующим Лабораторией геоморфологии и тектоники дна океана. Занимался проблемами палеоокеанологии, тектоническими реконструкциями, проблемами эволюции палеоокеана Тетис, Уральского и Азиатско-Гималайского поясов.



НЕПРОЧНОВ ЮРИЙ ПАВЛОВИЧ

(1930–2010) геофизик, доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, с 1974 по 2005 гг. – заведующий Лабораторией сейсмических исследований. В Институте океанологии работал с 1956 г. Его научная деятельность связана с созданием, развитием и совершенствованием отечественных морских сейсмических исследований.

Является автором и соавтором 370 научных статей и 18 монографий. Награжден орденами и медалями, в т.ч. «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.», «За трудовую доблесть».

СОЛОВЬЕВ СЕРГЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ (1930–1994),

геофизик, сейсмолог, доктор физико-математических наук, академик РАН. С 1978 г. и до конца своей жизни руководил созданной им в Институте океанологии Лабораторией сейсмологии. Он заложил основу нового научного направления – морской сейсмологии. Признание его научных заслуг выразилось в присуждении ему в 1985 г. и 1988 г. престижных премий международных научных обществ и учреждение в 1996 г. медали им. С.Л. Соловьева



Междисциплинарной рабочей группой по природным катастрофам.



ЩЕРБАКОВ ФЕДОР АНАТОЛЬЕВИЧ (1930–2002),

геолог, литолог, океанолог, доктор географических наук. Занимался проблемами четвертичной геологии и геоэкологии шельфа России. Автор более 200 научных публикаций. Был членом бюро рабочей группы "Шельф" Комиссии по проблемам мирового океана АН СССР;

членом подкомиссии по Черному и Средиземному морям, Комиссии по береговым линиям СССР.



90 лет

БАРАШ МАКС СЕМЕНОВИЧ (1935–2020), геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор, с 1981 по 2005 г. – заведующий Лабораторией палеоэкологии. В своей докторской диссертации он впервые в мировой науке реконструировал позднечетвертичные палеотемпературы поверхностной воды по структуре танатоценозов планктонных фораминифер. Основатель и глава направления «палеоокеанологические реконструкции по палеоэкологическим данным». Автор около 200 опубликованных научных работ.

БОГДАНОВ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ (1934–2014) геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор. Его научная деятельность была связана с подводными геологическими исследованиями на ГОА «Пайсис» и «Мир» гидротермальных высококобальтовых корок и конкреций подводных гор и гидротермальных рудопроявлений океанических рифтов. Он является одним из первооткрывателей новых крупных залежей корок и конкреций. Им был открыт принципиально новый тип рудоносных гидротермальных систем. Автор более 400 научных работ. Участвовал более чем в 30 океанологических экспедициях, в т.ч. на буровых судах "Гломар Челленджер" и "Джойдес Резолюшн". За организацию и руководство океанологическими исследованиями в районе гибели атомной подводной лодки "Комсомолец" и проявленное при этом мужество был награжден в 1994 г. Орденом мужества.



ГУРВИЧ ЛЕВ МОИСЕЕВИЧ (1935–2007), горный инженер, доктор технических наук. Основное направление работ – исследование источников поступления, форм миграции, механизмов трансформации нефти в морской среде и, на основании результатов этих исследований, разработка методов и средств предотвращения нефтяного загрязнения Мирового океана и борьбы с последствиями аварийных нефтяных разливов. Им разработана методология исследования, связывающая процессы образования нефтяных загрязнений в техногенезе с последующими процессами их взаимодействия с факторами природной среды.

ЕМЕЛЬЯНОВ ЕМЕЛЬЯН МИХАЙЛОВИЧ (1934–2017), инженер-геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный деятель



науки РФ, почетный член Союза геологов Литвы, заведующий Лабораторией геологии Атлантики АО. В 1958 г. стал сотрудником Института океанологии – сначала Южного отделения, а с 1963 г. – Атлантического. В 1964 г. организовал лабораторию геологии Атлантики. Представлял Россию в рабочей группе по составлению геолого-геофизических карт Средиземного и Черного морей МОК ЮНЕСКО. Включен в международный справочник «Выдающиеся люди 20-го столетия», изданный

Биографическим центром Кембриджа, в международную энциклопедию «Гуманистика», Энциклопедию Литовской Республики.

МОСКАЛЕВ ЛЕВ ИВАНОВИЧ (1935–2020), биолог, кандидат биологических наук. С 1964 г. работал в Институте в лаборатории донной фауны океана, участник экспедиций на СП и глубоководных погружений на ГОА «Пайсис» и «Мир». Инициатор целого ряда новых подходов к изучению донной фауны, этапными работами стали работы по распределению донной фауны в желобах Карибского бассейна, заливе Аляска, в Центрально-Арктическом бассейне. При его активном участии начала формироваться первая и единственная в России коллекция гидротермальной фауны. Создал уникальную базу фотографий донных животных и биотопов, полученных с ГОА.



ПАВЛИДИС ЮРИЙ АНГЕЛЕЕВИЧ (1935–2007), геоморфолог, доктор географических наук. С 1958 г. в Институте океанологии занимался изучением морских берегов и шельфа морей и океанов. Участник многочисленных морских экспедиций в различных районах Мирового океана, прибрежных экспедиций в разных странах. За успешные исследования в Арктике был награжден премией им. О.Ю. Шмидта.

РОЗАНОВ АЛЕКСАНДР ГЕОРГИЕВИЧ (1935–2018), геохимик, кандидат химических наук. Работал в Институте океанологии с 1958 г. Заведовал Аналитической лабораторией в ИО РАН, а затем возглавлял лабораторию Химии придонного слоя. С 1986 г. начал развивать новое направление исследований, связанное с оценкой процессов химического обмена на границе вода–дно и их влияния на формирование состава морской воды и донных осадков. Благодаря его инициативе и энергии была создана и введена в эксплуатацию уникальная автономная многофункциональная донная станция «Лендер ИО РАН», которая позволила проводить прямые измерения потоков



химических компонентов на границе вода–дно.



ТРОЦУК ВЛАДИСЛАВ ЯКОВЛЕВИЧ (1934–1995), геолог, доктор геолого-минералогических наук. Автор 140 научных трудов. С 1969 г. работал в ИО АН СССР, с 1981 г. был заведующим Лабораторией нефтегазогенетического районирования акваторий. Занимался теоретическими и экспериментальными исследованиями генетических вопросов нефтегазобразования и нефтегазонакопления в разнотипных осадочно-породных бассейнах акваторий. Был

заместителем председателя рабочей группы по нефти и газу Секции геологии, геофизики и геохимии Комиссии АН СССР по проблемам Мирового океана; заместителем председателя Секции геохимических методов Научного совета по проблемам геологии и геохимии нефти и газа АН СССР; членом геолого-геоморфологической секции Совета по комплексному изучению проблем Каспийского моря; членом Американской Ассоциации Нефтяных Геологов.

85 лет



АВИЛОВ ВЛАДИМИР ИГОРЕВИЧ (1939–2013), геоэколог, доктор технических наук. Осуществлял внедрение технических средств и методов, обеспечивающих получение достоверных газобиохимических данных. Им опубликовано более 200 научных работ.

ЕСИН НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ (1939–2021) океанолог, эколог, доктор географических наук, Заслуженный

деятель науки Кубани. Был заведующим Лабораторией экологии Южного отделения. Главным направлением его научной деятельности было создание теории эволюции абразионных берегов, которая впоследствии была адаптирована для описания эволюции шельфа. Также предметом интереса был механизм образования и последующая деградация морей Паратетиса. Принимал участие в проектах ЮНЕСКО, касающихся изменения уровней Черного, Каспийского и Средиземного морей в различные геологические времена: в голоцене, плейстоцене, плиоцене. Опубликовал более 150 научных статей и две монографии.



КОПЕЛЕВИЧ ОЛЕГ ВИКТОРОВИЧ (1940–2020) океанолог, оптик, доктор физико-математических наук, с 1988 по 2005 гг. – заведующий Лабораторией оптики океана. В 1983 г. провел первые комплексные оптические исследования вод Амазонки и ее притоков. Начиная с

1993 г., активно развивал методы использования данных спутниковых сканеров цвета для исследования и мониторинга морей и океанов, разработал алгоритмы расчета по данным светорассеяния содержания морской взвеси. Автор и соавтор более 130 научных работ и 6 монографий. Участник 16 океанских экспедиций.



ЛУКАШИН ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ (1940–2018), геолог, доктор геолого-минералогических наук, с 1966 работал в Лаборатории физико-геологических исследований. Принимал участие в 30 научных экспедициях, автор 200 научных работ. Основное направление исследований – седиментация на континентальных склонах под влиянием контурных течений. В 1989 г. возглавил исследования

потоков осадочного вещества в океанской толще, для чего под его руководством были созданы новые седиментационные ловушки. Это дало возможность изучать потоки вещества в разных седиментационных обстановках. Впервые в нашей стране удалось получить осадочный материал, собираемый непрерывно в течение года, и определить основные закономерности сезонной изменчивости в распределении и составе осаждающегося вещества в Норвежском море. Был заместителем главного редактора журнала “Океанология”.

МЕЛЬНИКОВ ИГОРЬ АЛЕКСЕЕВИЧ (1939–2023), гидробиолог, доктор биологических наук, почетный полярник, неоднократный участник экспедиций на Северный и Южный полюса. Его исследования морских льдов дали возможность для проведения сравнительной оценки функционирования арктических и антарктических ледовых экосистем, что имеет особое значение для понимания биополярности в гидробиологии.



СВАЛЬНОВ ВЯЧЕСЛАВ НИКОЛАЕВИЧ (1939–2013), геолог, доктор геолого-минералогических наук. Круг научных интересов включал литологию, минералогию, гранулометрию и геохимию морских и океанских осадков, факторы и следствия перераспределения вещества на разных этапах пелагического литогенеза, процессы рудообразования в океане. Участник многих морских экспедиций. Автор 160 опубликованных научных работ.



СМИРНОВ ГЕННАДИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ (1940–2020), академик РАН. С 1995 г. был

руководителем Отдела научного флота РАН и Заведующим Лабораторией методологии и технических средств океанологических исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова. Автор 150 научных работ, 8 авторских



свидетельств и 17 патентов на изобретения.



СТУНЖАС ПАВЕЛ АНТОНОВИЧ (1940–2020), гидрохимик, кандидат физико-математических наук. Основное направление исследований – использование физико-химических методов в приложении к химии моря, разработка электрохимических датчиков кислорода. Автор более 80 работ.

ТРИМОНИС АЛЬГИС-ЭГИДИЮС СТАНИСЛАВОВИЧ

(1939–2011), инженер-геолог, доктор геолого-минералогических наук, профессор. С 1963 г. работал в Южном, а затем в Атлантическом отделении ИОАН. В 1966 г. первым среди геологов СССР получил уникальные пробы гидротермальных осадков из глубоководной впадины с горячими рассолами в Красном море. Участвовал в исследовании р. Амазонки, глубоководном бурении дна Черного моря на буровом судне «Гломар Челленджер». Погружался на дно Балтийского моря на ГОА «Мир».



80 лет

ВАЛЯШКО ГЕОРГИЙ МИХАЙЛОВИЧ (1945–1995), геофизик, кандидат физико-математической наук. В 1968 г. поступил в Институт океанологии. Впервые создал автоматизированную систему «Матрос» для сбора и оперативной обработки геофизической информации на борту судна, им предложен и обоснован впервые в мировой практике методический комплекс приведения к плоскости данных придонных магнитных измерений с глубоководных буксируемых носителей. Впервые создал математическую



систему обработки и интерпретации данных морской градиентной съемки с двумя и тремя буксируемыми датчиками. Один из основных авторов монографий: «Магнитное поле океана», «Петромагнитная модель литосферы» и «Anomalous Magnetic Field of the World Ocean».

САВОСТИН ЛЕОНИД АЛЕКСЕЕВИЧ (1944–2004), доктор геолого-минералогических наук. Его основные научные интересы были сосредоточены на разработке методики палеогеодинамических построений, на ее применении к отдельным регионам и для всей Земли в целом. Работал в Институте океанологии с 1971 г. В 1992–1994 гг. был директором Института.



75 лет

КУЛИКОВ ЕВГЕНИЙ АРКАДЬЕВИЧ (1950–2020), доктор физико-

математических наук, заведующий Лабораторией цунами им. С.Л. Соловьева Являлся специалистом в области исследования волн цунами и других волновых процессов в океане, динамики зоны шельфа, анализа временных рядов, одним из лучших в мире специалистов в области анализа инструментальных записей волн цунами. Автор около 100 научных статей, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах, а также 2 монографий.



70 лет

МАККАВЕЕВ ПЕТР НИКОЛАЕВИЧ (1955–2020), гидрохимик кандидат географических наук, с 2000 г. был заведующим Лабораторией биогидрохимии. Основное направление научной деятельности – карбонатная система природных вод, ее пространственная и временная изменчивость различных масштабов, роль океана в глобальном балансе углерода.

ПЕРЕСЫПКИН ВАЛЕРИЙ ИВАНОВИЧ (1955–2016), геохимик, доктор геолого-минералогических наук, с 2005 г. был заведующим Лабораторией химии океана. Принимал участие в 20 крупных океанологических морских экспедициях Института и на судах ГЕОХИ, Болгарской академии наук и МГУ. При проведении экспедиционных работ с 1991 по 2005 гг. НИС "Академик Мстислав Келдыш" в районах гидротермальной деятельности Срединно-Атлантического хребта и Восточно-Тихоокеанского поднятия были впервые получены уникальные данные по содержанию и распределению алканонафтенных углеводородов в гидротермальных рудах «черных» и «белых» курильщиков.



Хотим поздравить юбиляров нашего Института, которые продолжают свою активную научную деятельность. И пожелать им крепкого морского здоровья, научных открытий, счастья!!!

Поздравляем с юбилеем: Врио директора Института *Шевченко В.П.*, академика РАН, научного руководителя Института океанологии *Нигматулина Р.И.*, академика РАН *Флинта М.В.*, и.о. зам. директора *Гебрука А.В.*; Коллег-морских геологов и не только: *Левченко Д.Г.*, *Жмура В.В.*, *Бышева В.И.*, *Ушакову М.Г.*, *Амбросимова А.К.*, *Немировскую И.А.*, *Леонтьева И.О.*, *Иванову Е.В.*, *Ковачева С.А.*, *Дубинина А.В.*, *Матуля А.Г.*, *Соловьеву Н.В.*, *Верещаку А.Л.*

***МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ АРКТИКИ
И АНТАРКТИКИ***

***MARINE GEOLOGY OF THE
ARCTIC AND ANTARCTIC
REGIONS***

**Аветян С.Г.^{1,2}, Якимова К.С.¹, Новичкова Е.А.¹,
Козина Н.В.¹**

(¹Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, г. Москва.e-mail:
stefaniaavetyan@mail.ru; ²Московский государственный университет им. М.В.
Ломоносова, г. Москва)

Гранулометрический состав поверхностного слоя донных осадков Гренландского моря

**Avetian S.G.^{1,2}, Yakimova K.S.¹, Novichkova E.A.¹,
Kozina N.V.¹**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow)

Grain size distribution of surface sediments in the Greenland Sea

Ключевые слова: поверхностные осадки, гранулометрический состав, Гренландское море, архипелаг Шпицберген

Представлены результаты исследования гранулометрического состава одиннадцати поверхностных проб осадка, отобранных в Гренландском море в ходе 84-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» на двух субширотных разрезах. Выявлены закономерности распределения частиц в поверхностном слое осадков, и дана относительная оценка деятельности придонных течений. Также определены предположительные пути переноса терригенного материала в районе хребтов и глубоководной части бассейна Гренландского моря.

Гранулометрический анализ позволяет определить фракционный состав осадков и является важным методом в изучении седиментационных процессов, происходящих в современных бассейнах. Благодаря этому методу можно делать выводы о происхождении отложений и особенностях их накопления [3]. Достаточно большое влияние на седиментационную систему Гренландского моря оказывают процессы ледового и айсбергового разноса [6].

Геологические работы в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2021 г.) проходили в водах Норвежско-Гренландского бассейна и Баренцева моря. В данной работе гранулометрический анализ выполнен для 11 поверхностных проб, отобранных в Гренландском море. Первый субширотный разрез (станции 7061, 7050, 7059, 7057 и 7053) проходит вдоль Гренландской зоны разломов (глубины 3000–3600 м). Второй субширотный разрез (станции 7088, 7089, 7083, 7081) параллелен Шпицбергенской зоне разломов (глубины до 3000 м). Станция 7065 расположена на подножии континентального склона южной оконечности острова Шпицберген (глубина 1949 м), станция 7051 – в центральной части Гренландской котловины (глубина 3548 м) (рис. 1).

Поверхностный слой донных осадков Гренландского моря сложен в основном песчано-алеврито-пелитовыми и алеврито-пелитовыми илами коричневого и оливково-коричневого цветов (10YR/4/3) с высоким содержанием раковин фораминифер и спикул губок. Также встречаются единичные обломки пород гравийной размерности [2].

Для данной работы были проанализированы пробы интервала 0–1 см из колонок донных осадков, отобранных с помощью мультикорера Mini Musc K/MT 410 (МК, изготовитель KUM, Германия).

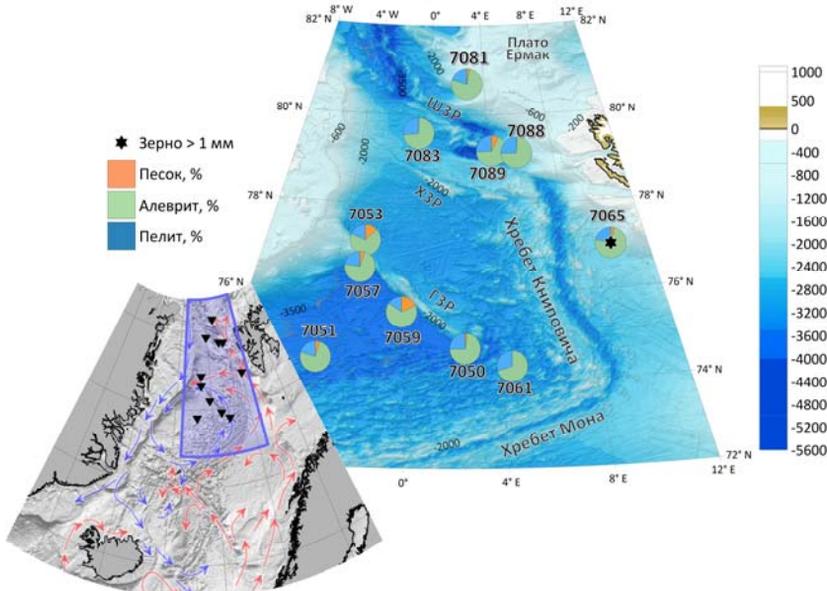


Рис. 1. Карта-схема изученных колонок, отобранных в 84-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». ГЗР – Гренландская зона разломов; ХЗР – Ховгардская зона разломов; ШЗР – Шпицбергенская зона разломов.

Гранулометрический анализ терригенной фракции выполнялся на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD 2300 в Институте океанологии РАН. Перед анализом в пробах были удалены органика (H_2O_2 37%), карбонаты (HCl 10%) и биогенный кремнезем (NaOH 6%) для выделения терригенной компоненты осадка. Перед отбором полученная суспензия пропусклась через сито с диаметром ячейки 1 мм.

Для отбора проб перед измерением был использован электромеханический прижимной делитель проб для отбора аликвотных проб суспензии, разработанный Д.Г. Борисовым (Лаборатория палеоокеанологии Института океанологии РАН). Для каждого образца последовательно отбирались и измерялись три аликвоты. Повторные

результаты гранулометрического анализа для каждой пробы усреднились при помощи скрипта (программного кода на языке R) в программе RStudio.

Для песчаной и пелитовой фракций в работе использована иностранная шкала размеров частиц [5], а границы алевритовых фракций даны по [7]. Принятая в настоящей работе шкала отображена на рис. 2.

Расчет статистических показателей был выполнен в программном пакете Gradistat 9.1 по методу расчета, который предложен в работе Фолка и Варда [4]. Для относительной оценки деятельности придонных течений был рассчитан средний диаметр минеральных частиц во фракции 10–63 мкм, так называемый «сортируемый алеврит» (\overline{CA}). Согласно теории [7], увеличение значений \overline{CA} соответствует увеличению относительной скорости придонного течения.

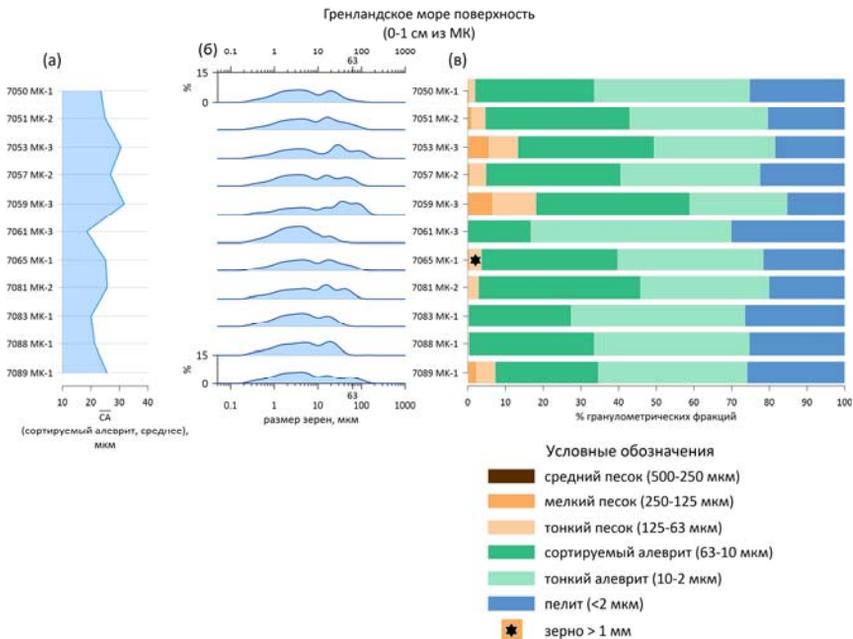


Рис. 2. Результаты гранулометрического анализа поверхностного слоя донных осадков Гренландского моря.

В изученных образцах в гранулометрическом распределении терригенной фракции преобладала алевритовая фракция ~ 65%. Пелитовая фракция составила ~ 25%, песчаная ~ 10% (рисунки 1, 2в).

В образце со ст. 7065 обнаружено единичное неокатанное зерно мелкогравийной размерности. Оно имеет треугольную форму с острыми гранями и обликом напоминает ледниковый ледогранник. Предположительно, эта находка может быть проинтерпретирована как

материал айсбергового разноса, происходящий из ледников западного побережья архипелага Шпицберген, некоторые из которых оканчиваются в море [1].

Характер кривых распределения частиц полимодальный, с преобладанием бимодального (рис. 2б).

СА изменяется в пределах от 18 мкм до 31 мкм (рис. 2а). Образцы из колонок 7053 и 7059 имеют наибольший показатель, что позволяет предположить более активную придонную гидродинамику в местах отбора данных проб. Образцы 7061 и 7083 характеризуются противоположными параметрами, что указывает на более спокойное осадконакопление, что также подтверждается отсутствием песчаной фракции.

В целом, преобладание в терригенной составляющей поверхностных осадках алевритовой фракции может быть связано с удаленностью источника сноса, относительной глубоководностью и умеренной гидродинамикой.

Первый разрез, проходящий вдоль Гренландской зоны разломов, характеризуется следующим гранулометрическим распределением. Образцы поверхностного слоя осадков со станций 7061 и 7050 имеют схожий гранулометрический состав: выраженное преобладание алевритовой фракции и отсутствие песчаной фракции. Это может быть связано с тем, что локальные понижения рельефа в зоне подводного хребта являются естественными ловушками на пути переноса и седиментации терригенного материала. По своему гранулометрическому составу поверхностные осадки со станций 7059, 7057, 7053 также похожи, что позволяет предположить их общий источник материала и механизм поступления. Вероятно, основной транспорт терригенного материала происходит с континентальной окраины Гренландии вдоль простирания Гренландской зоны разломов.

Осадки ст. 7051, расположенной в глубоководной части Гренландского моря, характеризуются преобладанием алевритового материала, вероятно связанного с удаленностью источника сноса.

Второй субширотный разрез проходит около Шпицбергенской зоны разломов и имеет схожее гранулометрическое распределение. Поверхностный слой донных осадков на ст. 7089 (глубина около 2000 м), характеризуется преобладанием алевритового материала и небольшой песчаной примесью. Возможный источник сноса – континентальная окраина шельфа Шпицбергена. Поверхностный осадок на ст. 7081 так же содержит песчаную фракцию, которая может быть привнесена с плато Ермак.

Таким образом, проанализирован гранулометрический состав поверхностных осадков Гренландского моря. Для отдельных морфоструктур дна моря (хребты, глубоководная часть бассейна) выявлены закономерности распределения частиц в поверхностном слое осадков и дана относительная оценка деятельности придонных течений. Сделано

предположение о возможных путях перемещения терригенного материала. Дальнейшие исследования минерального состава осадков позволят с большей точностью установить пути переноса терригенных частиц в Гренландском море.

Авторы благодарят экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш» а также всех участников экспедиции за помощь в работе с донными осадками. Отдельная благодарность выражается М.Д. Кравчишиной за общее руководство в экспедиции.

Работа выполнена по проекту Российского научного фонда № 25-27-00123, https://rscf.ru/prjcard_int?25-27-00123. Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldysh>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврушин Ю.А. Особенности накопления и строения ледниково-морских отложений в условиях фиордового побережья (на примере Шпицбергена) // Литология и полезные ископаемые. 1968. № 3. С. 63–79.
2. Новичкова Е.А., Матуль А.Г., Козина Н.В. и др. Отчет о работе отряда геологии и палеоокеанологии // Отчет 84^{го} рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш». М.: ИО РАН, 2021. С. 246–308.
3. Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. Москва: Наука, 2005. 297 с.
4. Folk R.L., Ward W.C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters // Journal of Sedimentary Petrology. 1957. V. 27. P. 3–26. <https://doi.org/10.1306/74d70646-2b21-11d7-8648000102c1865d>.
5. Friedman G.M., Sanders J.E. Principles of Sedimentology. New York: Wiley, 1978. 792 p.
6. Lisitzin A.P. Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past. Springer, 2022. 563 p.
7. McCave I.N., Manighetti B., Robinson S.G. Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for paleocurrent speed and paleoceanography // Paleoceanography. 1995. V. 10. № 3. P. 593–610. <https://doi.org/10.1029/94PA03039>.

This study is based on the results of granulometric analysis of 11 surface layer sediment samples from two sublatitudinal sections obtained from Greenland Sea. The predominance of the silt fraction over the clay and sand fractions was revealed. Particle size distribution data together with the sortable silt statistical parameter allow us to understand sedimentation features of the Greenland Sea surface sediments and make predictions about underwater hydrodynamics and its connection with geomorphology.

Алексеева Т.Н., Булохов А.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:tania@blackout.ru)

Гранулометрический состав поверхностных осадков севера Баренцева моря и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана

Alekseeva T.N., Bulokhov A.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Granulometric composition of the surface sediments of the North Barents Sea and adjacent area of the Arctic Ocean

Ключевые слова: Баренцево море, банка Ушакова, трог Эрик-Эриксона, Квитойя, Хинлопен, Франц-Виктория

Представлены результаты гранулометрического анализа поверхностных донных осадков севера Баренцева моря и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана, отобранных в местах с разными обстановками осадконакопления, различным рельефом и глубиной моря. Выявлены основные вещественно-генетические типы поверхностных осадков изученного района.

Тридцать проб поверхностных осадков, полученных летом 2024 г. в 96-ом рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в разных частях на севере Баренцева моря и прилегающей акватории Северного Ледовитого океана, были изучены гранулометрическим анализом (рис. 1). Цель данной работы – выявить особенности пространственного распределения значений гранулометрических фракций в поверхностных донных осадках в зависимости от обстановок осадконакопления.



Рис. 1. Карта станций отбора осадков в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Отбор проб осадка производили с помощью дночерпателя (ДЧ) «Океан-50» [1]. Гранулометрический анализ выполнен водно-механическим методом [2], тип осадка определяется согласно классификации морских донных осадков Безрукова, Лисицына [3].

Соотношение фракций на меридиональном разрезе, проходящем по 60° с.ш. через Восточно-Баренцевоморскую впадину, показано на рис. 2.

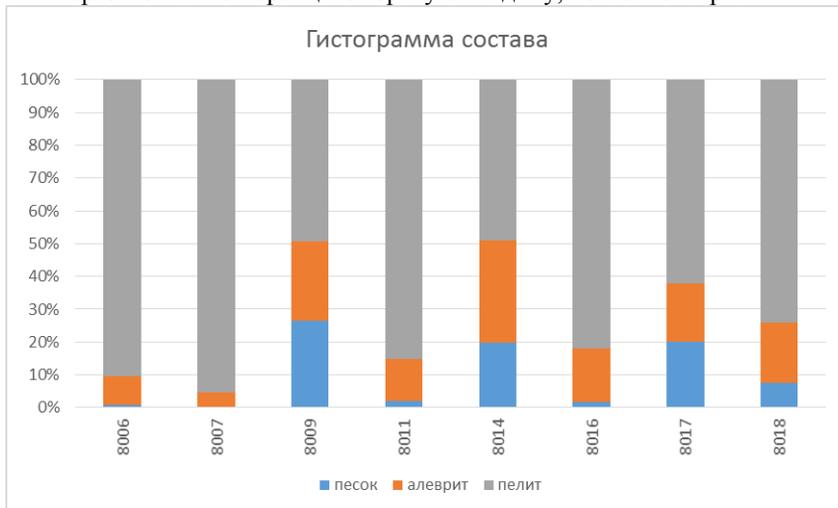


Рис. 2. Распределение основных гранулометрических фракций в поверхностном слое донных осадков на меридиональном разрезе в Баренцевом море.

На станциях 8006 (335 м), 8007 (281 м), 8011 (257 м), 8016 (308 м), 8018 (184 м) поверхностные осадки представлены пелитовыми илами, на 74.1–95.5% состоящие из частиц размером менее 0.01 мм, с примесью алевритового (4.1–18.3%) и песчаного материала (0.4–7.6%). По мере уменьшения глубины и приближения к Земле Франца-Иосифа, на станциях 8009 (196 м), 8014 (180 м), 8017 (228 м) осадок становится более грубозернистым и был представлен пелитом песчано-алевритовым и алевритово-песчанистым. Содержание песчаных фракций составляет 19.8–26.5%, алевритовых 17.9–31.1% и пелитовых 49.2–62.0%.

Банка Ушакова (рис. 3) располагается к юго-западу от архипелага Земли Франца-Иосифа, ограничиваясь с запада желобом Франц-Виктория, а с востока – Северо-Восточным плато [5]. Осадки, отобранные на банке Ушакова на станциях 8021 (73 м), 8022 (78 м), 8023 (116 м), представлены алевритистыми песками с повышенным содержанием раковин двустворчатых моллюсков, а также большим количеством живых бентосных организмов [1]. Среднее содержание песчаных фракций составляет 62.9%, алевритовых 16.7%, пелитовых 20.3%.

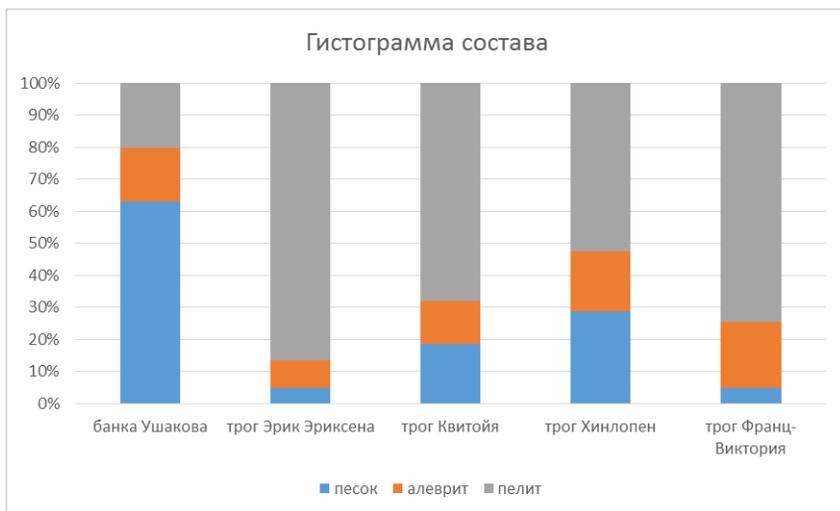


Рис. 3. Среднее распределение основных гранулометрических фракций в поверхностном слое донных осадков севера Баренцева моря

Трог Эрик-Эриксен расположен на северо-западе Баренцева моря от пролива Хинлопен до южной части трога Франц-Виктория [5]. При переходе от неглубоких, песчаных осадков на банке Ушакова к пелитовым осадкам (станций 8025, 8027, 2028, 8029, 8031, 8034, 8036) в троге Эрик-Эриксона (132–336 м) наблюдается резкое увеличение содержания пелитовых фракций (64.0–96.1%) и понижение песчаных (0.8–14.5%). На борту трога на ст. 8036 (132 м) в пелитовых осадках присутствует обломочный материал, а на поверхности осадка – офиуры, ежи, полихеты, створки раковин моллюсков, железомарганцевые образования [1]. Среднее содержание песчаных фракций по трогу Эрик-Эриксен составляет 4.9%, алевроитовых 8.5%, пелитовых 86.6%.

Наиболее северные изученные районы – это трог Квитойя, Хинлопен и Франц-Виктория. Трог Квитойя расположен в северной части Баренцевоморского шельфа, к востоку от острова Северо-Восточная Земля архипелага Шпицберген [5]. На станциях 8038 (531 м), 8042 (260 м), 8054 (512 м), 8056 (959 м) осадки представлены пелитовыми илами с содержанием пелитовой фракции 67.6–96.0%, песчаной – 0.9–9.6%. На ст. 8050 (188 м) количество песчаной фракции увеличивается до 65.0%. Среднее значение пелитовых фракций по трогу Квитойя составляет 68.1%, алевроитовых 13.3% и песчаных 18.6%. Трог Хинлопен (станции 8058, 8059, 8060, 8064, 8066) находится к северу от архипелага Шпицберген в Северном Ледовитом океане. На ст. 8058 (168 м) наблюдается резкое увеличение песчаной фракции до 70.1% и снижение пелитовой до 17.8%.

Поверхностные осадки трого Хинлопен на ст. 8059 (336 м) и 8060 (332 м) были отобраны в областях проявления газовых сипов (отчетливый запах сероводорода, наличие стяжений гидротроилита) [1]. Осадки представлены пелитовыми песчанистыми алевритами с включениями обломочного материала. Содержание пелитовых фракций 61.8 и 69.6%, песчаных соответственно – 11.1 и 2.2%. Осадки ст. 8064, отобранные на континентальном склоне, представлены пелитовыми песками (песок – 52.5%, пелит – 34.8%) с примесью обломочного материала и железомарганцевых корок. Среднее содержание пелитовых фракций по трогам Хинлопен составляет 52.6%, алевритовых 18.7% и песчаных 28.7%. В осадках трого Франц-Виктория ст. 8059 (296 м), 8060 (349 м) преобладают пелитовые фракции, в среднем 74.4%. Среднее содержание алевритовых фракций – 20.8%, песчаных – 4.8%

Характерной чертой донных осадков исследуемого региона является преобладание в них терригенного разномерного материала, его основным источником является архипелаг Шпицберген и острова архипелага Земли Франца-Иосифа. Самыми распространенными осадками являются пелитовые илы (преобладающая фракция <0.01 мм). Распределение типов осадков по площади дна подчиняются законам вертикальной и циркумконтинентальной зональности: отложения становятся более мелкозернистыми при удалении от берегов и увеличении глубины моря [6]. Отклонение от закона обусловлены воздействием динамических факторов – оползней, обрушения, придонные течения и т.д. Велико влияние ледников, оно проявляется не только в разносе крупного материала, но и в поступлении в море тонкодисперсного материала при их таянии. Максимальная концентрация алевритового материала приходится на осадки, отобранные на склонах впадин и в районе сипов. Пески алевритовые и алевритово-глинистые встречаются вблизи берегов на небольших глубинах, где гидродинамический режим более активен, либо на склонах трогов и впадин, независимо от глубины. Повсеместно отмечается примесь грубообломочного материала, что связано с рельефом дна, гидродинамическими факторами, ледовым разносом и широким распространением реликтовых ледниковых отложений [6]. На трогах Квитойя и Эрик-Эриксен достоверно выявлены многочисленные признаки неотектонической активности – дизъюнктивные деформации сбросо-взбросового типа [5].

Экспедиционные исследования выполнялись в рамках Госзадания Министерства образования и науки РФ (тема № FMWE-2024-0020), анализ и интерпретация данных проведены при финансировании Российского научного фонда (проект № 25-17-00334). Авторы благодарны всем участникам 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новичкова Е.А., Матуль А.Г., Баранов Б.В. и др. Отчет о работе отряда геологии и палеонтологии в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». М.: ИОРАН, 2024. Т. 2. С. 50–133.
2. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
3. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в Дальневосточных морях. Тр. Ин-та океанологии. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.
5. Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 295 с.
6. Павлидис Ю.А и др. Арктический шельф. Позднечетвертичная история как основа прогноза развития. М: ГЕОС, 1998. 187 с.

Thirty surface bottom sediments of the North Barents Sea and adjacent area of the North Ocean, collected in places with different sedimentation environments, different relief and sea depth, were studied by granulometric analysis. The main material-genetic types of surface sediments of the studied area were identified.

**Алешина К.Ф.¹, Никишин А.М.¹, Татаринов В.Ю.²,
Родина Е.А.¹**

(¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, e-mail: kfstartseva@gmail.com; ²Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва)

Структура и развитие коры ультрамедленного спрединга в Евразийском бассейне

Aleshina K.F.¹, Nikishin A.M.¹, Tatarinov V.Yu.², Rodina E.A.¹

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements, Moscow)

Structure and evolution of the ultra-slow spreading crust in the Eurasian basin

Ключевые слова: Евразийский бассейн, хребет Гаккеля, ультрамедленный спрединг, океаническая кора, сейсмостратиграфия, тектоностратиграфия.

На основании новых данных геофизики, батиметрии и бурения актуализирована представленная ранее модель строения и развития коры ультрамедленного спрединга Евразийского бассейна. В разрезе осевой части бассейна выделены палеорифтовые долины. В истории бассейна выделяются этапы: 1) континентального рифтинга и базальтового магматизма (палеоцен), 2) раскрытия океанического бассейна в режиме нормального спрединга (ранний эоцен); 3) ультрамедленного спрединга (поздний эоцен), 4) еще большего замедления спрединга (олигоцен – квартер). Переход к ультрамедленному спредингу в позднем эоцене связывается с формированием сети сбросов сдвига-растяжения на большой территории, объединяющей Восточно-Сибирский и Северо-Чукотский бассейны.

Нами публиковались данные о структуре коры в Евразийском бассейне и, главным образом, в прилаптевоморской его части [1]. В соответствии с данными бурения, геофизической разведки и глубинной батиметрии была представлена модель строения фундамента Евразийского бассейна. С этого момента были получены новые данные детальной батиметрии, которые позволили скорректировать предложенную модель фундамента (рис. 1).

Одной из главных проблем построения модели фундамента Евразийского бассейна является разреженность сейсмических данных. При этом на профилях, проходящих вкост простирания хребта Гаккеля – осевого хребта Евразийского бассейна, – выявляется чередование горстов и грабенов (например, [3]). Вместе с тем, по данным гравиметрии и магниторазведки устанавливается генеральное направление протяженности структур бассейна вдоль его осевого хребта (например, [5, 6]). В работе [1] была предложена методика построения модели фундамента по разреженным сейсмическим данным, которая в первом приближении учитывала бы протяженность структур фундамента, устанавливаемую по грави- и магнитным аномалиям.

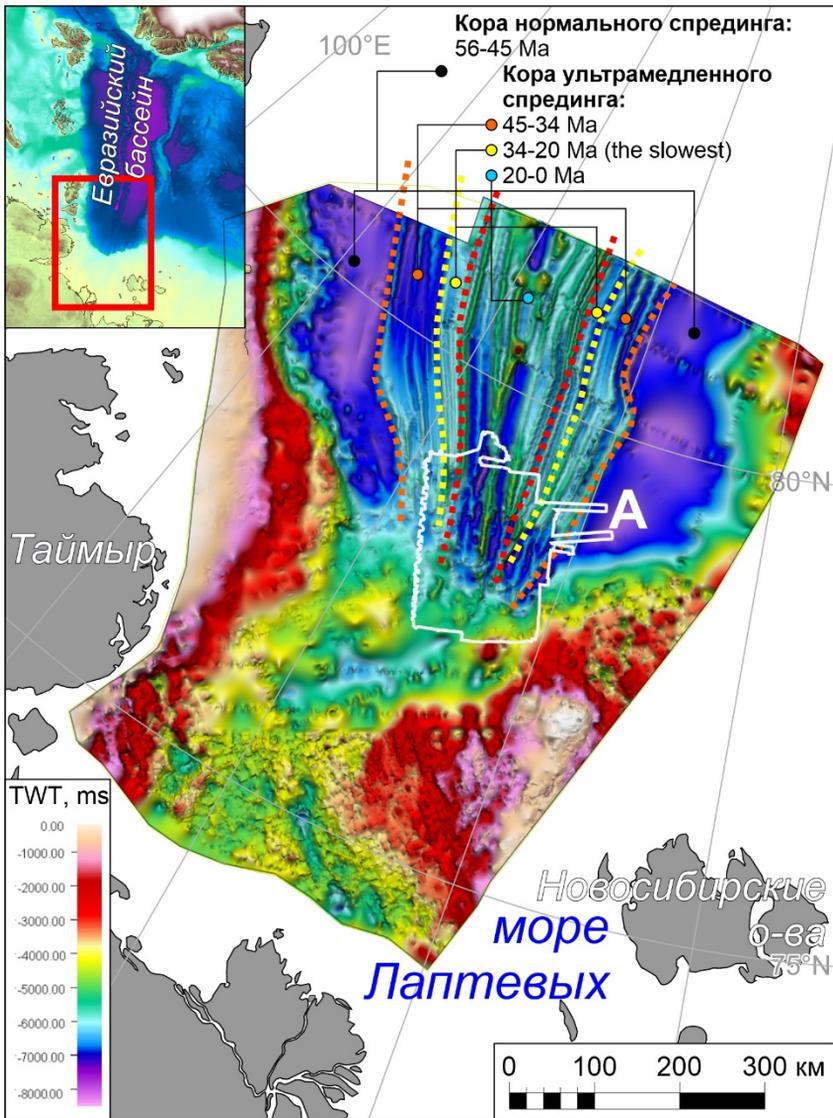


Рис. 1. Модель фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна по 2D сейсмическим данным [1 с дополнениями]. А – положение контура, изображенного на рис. 2.

Однако, несмотря на то, что современные данные гравитационных и магнитных полей позволили уточнить модель строения фундамента Евразийского бассейна, в определенных областях они допускают

неоднозначность структурных построений, либо разрешающей способности данных недостаточно для установления направления линейности грабенов и горстов, прослеживаемых по редкой сети сеймопрофилей. Так, неоднозначность построения сохранялась для ключевого участка хребта Гаккеля в пределах континентального склона в прилаптевоморской части Евразийского бассейна. В этом участке современный ультрамедленный спрединг прекращается, хребет Гаккеля захоронен под осадками масс-транспорта и находится в области континентального рифтинга [1].

Новые данные детальной батиметрии [2] позволили устранить эту неоднозначность и уточнить модель фундамента для выделенного участка хребта Гаккеля. Новые данные детальной батиметрии подтвердили предположение о протяженности горстов и грабенов, выделяющихся на сейсмопрофилях [4]. Направление структур, прослеживаемое по этим данным, в целом совпадает с направлением протяженности магнитных и гравитационных аномалий, развитых в Евразийском бассейне. Вместе с тем, батиметрия в выделенном участке сняла неоднозначность построения модели фундамента, которую допускали данные грави- и магниторазведки. Уточненная модель фундамента для этого участка изображена на рис. 2.

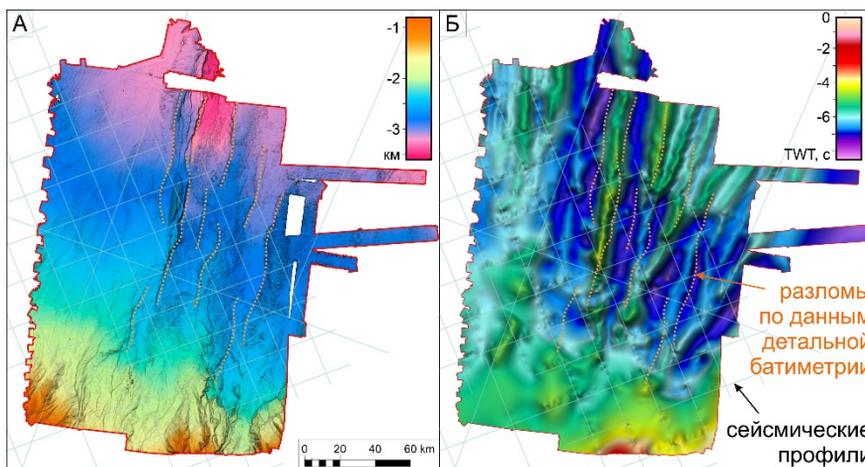


Рис. 2. Структурные карты для контура в пределах прилаптевоморского участка Евразийского бассейна, указанного на рис. 1-А. А – карта детальной батиметрии по [2] с дополнениями, Б – модель поверхности фундамента Евразийского бассейна в масштабах времени двойного пробега сейсмических волн.

В соответствии с новой моделью раскрытия Евразийского бассейна выделяются следующие этапы его развития (рис. 1):

1. Палеоцен (66–56 млн. л. н.). Континентальный рифтинг охватывает

область, включающую в себя о-в Шпицберген, Восточно-Баренцевоморский бассейн, арх. Земля Франца-Иосифа, поднятия Альфа и Ломоносова, арх. Де-Лонга. Изливаются базальты Фаддея, Ломоносовско-Анисинские, а также в пределах современных плато Ермак и поднятия Моррис-Джесуп [3, 4]. Формируются подводные вулканы, регистрируемые на сейсмопрофилях в прилаптевоморской части Евразийского бассейна [3, 4].

2. Ранний эоцен (56–45 млн. л. н.). Начало раскрытия Евразийского бассейна в режиме нормального спрединга. Скорость спрединга в прилаптевоморской части бассейна достигает 18–24 мм/год.

3. Поздний эоцен (45–34 млн. л. н.). Начало ультрамедленного спрединга. Скорость формирования океанической коры падает до 10–12 мм/год. С переходом к ультрамедленному спредингу в Евразийском бассейне совпадает формирование многочисленных сбросов на большой территории, включающей в себя Восточно-Сибирский и Северо-Чукотский бассейны.

4. Олигоцен – квартал (34–0 млн. л. н.) еще большее замедление ультрамедленного спрединга. Скорость формирования новой коры в прилаптевоморской части бассейна падает до 6 мм/год. В неогене в прилаптевоморской части бассейна рифтовая впадина заполняется осадками масс-транспорта.

Авторы благодарны коллегам из ПАО «НК Роснефть», МГУ, ГИН РАН, ИМГРЭ, ВНИИОкеангеология, ВСЕГЕИ, СПбГУ за дискуссии по геологии Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант 24-17-00020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алешина К.Ф., Никишин А.М., Родина Е.А. и др. Структура фундамента прилаптевоморской части Евразийского бассейна по геофизическим данным // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. Т. 63. № 4. С. 102–115.
2. Зинченко А.Г., Егоров С.В., Фирсов Ю.Г. и др. Новые данные о рельефе прилаптевоморского сектора континентального склона Евразийского бассейна (по результатам батиметрических съемок 2022 и 2024 гг.) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. № 11. С. 146–157.
3. Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов // Труды ГИН РАН. 2022. Т. 632. 156 с.
4. Родина Е.А., Никишин А.М., Алешина К.Ф. Проявления магматизма на При-Лаптевоморской части континентальной окраины Евразийского бассейна // Тектоника и Геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2024. Материалы LV Тектонического

совещания. М., 2024. Т. 2. С. 127–131.

5. Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A. et al. New aerogeophysical study of the Eurasia Basin and Lomonosov Ridge: Implications for basin development // *Geology*. 2003. V. 31. P. 825.

6. Glebovsky V.Y., Kaminsky V.D., Minakov A.N. et al. Formation of the Eurasia Basin in the Arctic Ocean as inferred from geohistorical analysis of the anomalous magnetic field // *Geotectonics*. 2006. V. 40. P. 263–281.

Based on new data from geophysics, bathymetry, and drilling, the previously presented model of the structure and development of the crust of the ultra-slow spreading of the Eurasian basin is updated. In accordance with the new data, the conclusion made earlier by the authors about the cessation of spreading in the North Sea basin 20 million years ago is being revised: the stop of spreading and filling of the rift valley with sediments from the continent, apparently, occurred later. Paleorift valleys are identified in the section of the axial part of the basin.

**Ананьев Р.А.¹, Дмитриевский Н.Н.¹, Росляков А.Г.¹,
Черных Д.В.²**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: ananuev@ocean.ru; ²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток)

**Проявления дегазации в верхней осадочной толще и
рельефе дна юго-восточной части моря Лаптевых
Ananiev R.A.¹, Dmitrevsky N.N.¹, Roslyakov A.G.¹,
Chernykh D.V.²**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of Far Eastern Branch RAS, Vladivostok)

Manifestations of degassing in the upper sedimentary strata and seabed relief of the SE Laptev Sea

Ключевые слова: дегазация, газонасыщенные отложения, ледовая экзарация, море Лаптевых

В юго-восточной части моря Лаптевых исследованы области газовой эмиссии в водную толщу и сопутствующие этому формы рельефа, а также выделены аномалии в осадках, связанные с повышенной газонасыщенностью. Прослежена взаимосвязь между этими процессами и явлениями, сделаны предположения о механизмах их возникновения.

В 2011–2020 гг. сотрудники Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН приняли участие в нескольких экспедиционных исследованиях в моря Восточной Арктики, особое внимание при этом было уделено изучению юго-восточной части моря Лаптевых [1, 2]. Во время экспедиционных исследований использовался комплекс гидроакустического оборудования – многолучевой эхолот, сейсмоакустический профилограф и гидролокатор бокового обзора, что позволило получить данные о рельефе морского дна и строении верхней осадочной толщи и выявить закономерности их развития, связанные с дегазацией.

Проведенные гидроакустические исследования показали широкое распространение в данном регионе газовых «факелов» и пузырьковых струй в водной толще [1–3]. Во многих случаях области газовыделения в водную толщу сопровождалось появлением на дне микрократеров, образующихся при определенных условиях в местах выхода газа из донных осадков в воду. В ходе экспедиции было зафиксировано большое количество таких пометок различной формы – округлых, изометричных и вытянутых, размером от нескольких десятков сантиметров до десятков метров.

Помимо прямой регистрации газовых выходов нами были обнаружены области аномалий в верхней осадочной толще, связанные с повышенным содержанием газа. Подобные зоны уверенно выделялись с помощью

сейсмопрофилирования, признаками газонасыщенности осадков на сейсмических записях являлись: резкое возрастание амплитуды отражений, появление большого количества дифрагированных волн, экранирование нижележащих границ (зоны «акустической тени»), задержка времени регистрации отражений от нижележащих границ, вызывающая их ложное прогибание, куполообразные и конусообразные вертикально ориентированные области акустически прозрачной или хаотической записи, резко дискордантные отражениям от субгоризонтальных геологических границ. Проведенный вблизи дельты Лены в подобной зоне «акустической тени» пробоотбор и последующий анализ этих данных подтвердили корреляцию между отслеживаемой профилографом границей аномалии и увеличением содержания газа в керне [3].

Еще одним эффектом, обусловленным близповерхностным залеганием газонасыщенных отложений, является провоцирование выбросов газа в воду экзарационным воздействием на морское дно. В результате проведенных исследований на шельфе моря Лаптевых на глубинах моря до 80 м были обнаружены многочисленные борозды с широким диапазоном разброса как по глубине их распространения, так и по их фактическим размерам (ширина и глубина борозд, их форма, протяженность, направление), при этом характерный вид этих объектов (траншея с отвалами грунта в одну или обе стороны) не оставляет сомнений в механическом характере воздействия на дно ледовых образований [4]. В районе исследований нами было обнаружено несколько участков со следами ледовой экзарации, где происходит газовая эмиссия (рисунок). На разрезе сейсмопрофилографа при этом отмечается наличие зон локального увеличения амплитуд на глубине под дном менее 1 метра в местах газовых выходов в водную толщу, при этом ниже этих зон на глубине около 2 м проникновение сигнала профилографа не прослеживается (рисунок). Такие акустические аномалии на разрезах могут являться прямыми индикаторами наличия газа в осадках. По нашему мнению, ледовое воздействие на морское дно в данном случае нарушает структуру осадков, создавая условия для вертикальной миграции газа. Этот процесс происходит, даже если глубина газового фронта превышает глубину экзарации, поскольку ниже борозды происходит нарушение структуры осадков, облегчающее возможность миграции газа к поверхности дна.

В районе пролива Дмитрия Лаптева на участках морского дна были обнаружены реликты полигональных структур, размеры и формы которых изменяются в довольно широких пределах. Их формирование связывают с эпохой позднплейстоценовой регрессии, когда восточно-арктический шельф представлял собой полностью осушенную зону и подвергался интенсивному промерзанию. Области распространения на дне полигональных структур сопровождаются появлением в разрезе вертикальных ослабленных зон, что облегчает миграцию флюидов из более

глубоких горизонтов к поверхности дна. Подтверждением изложенной интерпретации является общее увеличение концентрации метана в воде и атмосфере, фиксирующееся на этом участке акватории.

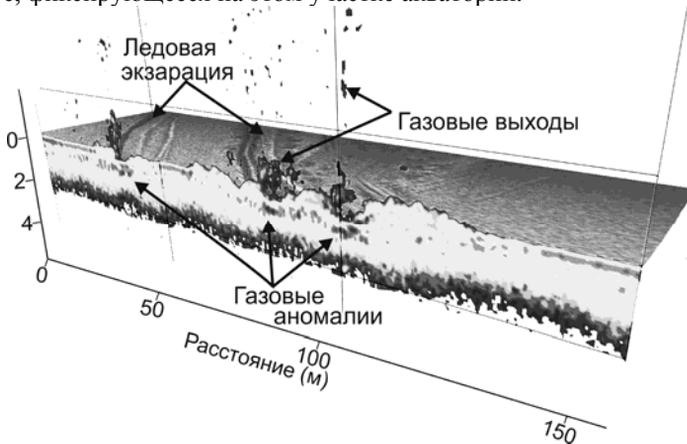


Рисунок. Трехмерное изображение участка исследований с газовыми выходами, вероятно спровоцированными воздействием ледовой эскаррации.

Палеогеографические особенности развития юго-восточной части моря Лаптевых в четвертичное время привели к образованию подводных многолетнемерзлых пород. В настоящее время происходит уменьшение арктического ледового покрова, усиление прогрева и перемешивание водных масс, а также увеличение придонных температур. Эти процессы, совместно с современной тектонической активностью региона, приводят к разрушению многолетнемерзлых пород с дальнейшим появлением участков дегазации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Росляков А.Г. Использование сейсмоакустического комплекса для исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в восточной Арктике // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 412–417. Doi: 10.7868/S0030157413020019.
2. Дмитриевский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А. и др. Геолого-акустические исследования в море Лаптевых в рейсе судна «Владимир Буйницкий» // *Океанология*. 2014. Т. 54. № 1. С. 128–132. Doi: 10.7868/S003015741401002X.
3. Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н., Росляков А.Г. и др. Использование комплексных акустических методов для мониторинга процессов эмиссии газов на шельфе арктических морей // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 1. С. 151–157. Doi: 10.31857/S0030157422010014.
4. Ananyev R., Dmitrevskiy N., Jakobsson M. et al. Sea-ice ploughmarks in the

eastern Laptev Sea, East Siberian Arctic shelf // Geological Society Memoir. 2016. V. 46. № 1. P. 301–302. Doi: 10.1144/M46.109.

Areas of gas emission into the water column, associated seabed landforms, and areas of anomalies in sediments associated with increased gas saturation were identified in the SE Laptev Sea. The relationship between these processes and phenomena was traced, and assumptions were made about the mechanisms of their occurrence.

**Богоявленский В.И.¹, Богоявленский И.В.¹,
Кишанков А.В.¹, Казанин А.Г.²**

¹Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, e-mail vib@ipng.ru;

²АО «Мурманская арктическая геологоразведочная экспедиция», г. Мурманск)

**Новая информация о субаквальной мерзлоте, газогидратах
и взрывной дегазации Земли на шельфе и суше Арктики**
**Bogoyavlensky V.I.¹, Bogoyavlensky I.V.¹, Kishankov A.V.¹,
Kazanin A.G.²**

¹Oil and Gas Research Institute of RAS, Moscow; ²JSC "Murmansk Arctic Geological Expedition", Murmansk)

**New information on subaqueous permafrost, gas hydrates and
explosive degassing of the Earth on shelf and on land of the
Arctic**

Ключевые слова: взрывная дегазация, выбросы газа, самовоспламенения, кратеры, многолетнемерзлые породы (ММП), газогидраты

Получена кардинально новая информация о распространении мерзлых пород и газогидратов на шельфе Арктики. Обоснован газодинамический генезис формирования и взрывов многолетних бугров пучения с образованием гигантских кратеров. На севере Западной Сибири обнаружено 7783 зоны взрывной дегазации (1344 в Карском море). Выявлены и изучены зоны техногенных выбросов газа.

Поиск и освоение месторождений углеводородов на шельфе и суше Арктике значительно осложняются при наличии многолетнемерзлых пород с сопутствующими газогидратами и высокой газонасыщенностью, часто приводящей к интенсивной (взрывной) дегазации. Авторы выполнили комплексные геолого-геофизические исследования данных явлений, при этом была получена фундаментально важная информация [1].

В 2020–2025 гг. исследовано распространение мерзлых (твердомерзлые, пластичномерзлые) и талых пород на мелководном (до 120 м) шельфе морей Западной и Восточной Сибири на площади около 1.9 млн. км² на основе анализа скоростей распространения преломленных волн по сейсмопрофилям МОГТ АО «МАГЭ» и АО «Росгеология» общей протяженностью более 45 тыс. км [1–4]. Установлено, что на большей части шельфа Восточной Сибири (57.6%, 737 тыс. км²) мерзлые породы деградировали (рис. 1), что также сокращает площадь возможного существования газогидратов. При этом в наибольшей степени (76.9%, 665 тыс. км²) мерзлота деградировала на шельфе Восточно-Сибирского моря. Это кардинально отличается от данных Международной ассоциации по мерзлотоведению (ИРА). Достоверность результатов авторов подтверждена данными бурения ряда скважин, включая ПАО «НК «Роснефть».

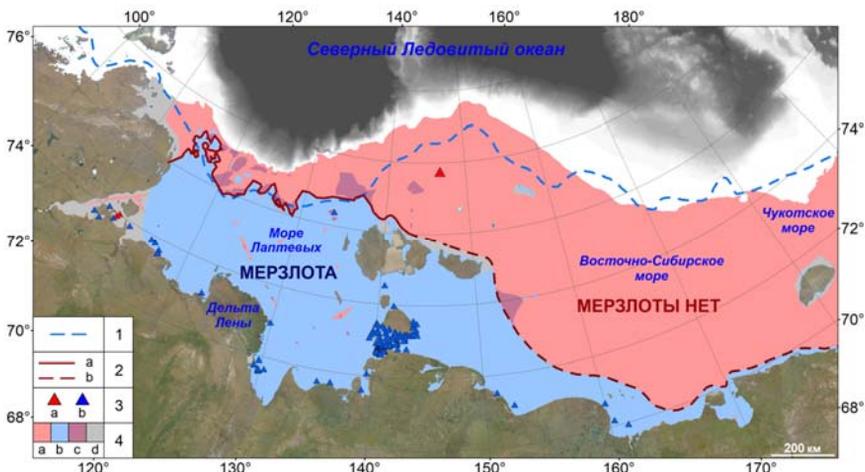


Рис. 1. Распространение мерзлых и талых пород на шельфе морей Восточной Сибири. Обозначения: 1, 2 – границы мерзлоты по данным ИРА (1) и авторов (2), включая уверенные (а) и требующие уточнения (b); 3 – не вскрывшие (а) и вскрывшие (b) мерзлоту скважины; 4 – талые (а), твердомерзлые (b), пластичномерзлые (с) породы и «серые зоны» недостатка информации (d).

В открытой юго-западной части Карского моря мерзлые породы преимущественно отсутствуют, сохранились лишь их редкоостровные участки, часть которых выявлена авторами по данным сейсморазведки и специалистами АО «АМИГЭ» при бурении скважин [5]. Подобная ситуация наблюдается также в центральной и северо-восточной частях Карского моря, что отличается от данных ИРА и результатов всех других исследований [6]. Весьма вероятно, что крупные массивы мерзлых пород сохранились в мелководных заливах и в узких прибрежных полосах, что требует дополнительного картирования.

В 2017–2023 гг. проведен комплексный анализ потенциальной газонасыщенности ВЧР арктических акваторий Восточной Сибири, Чукотки и Аляски (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское, Бофорта, Берингово) по временным разрезам МОГТ АО «МАГЭ» и USGS, общей протяженностью около 40 тыс. км [7]. В результате выявлено 2086 аномальных объектов – потенциальных залежей газа. В морях Лаптевых, Чукотском, Бофорта и Беринговом большинство верхних частей аномальных объектов находятся на глубинах до 100 м от дна, что связано с большим количеством достигающих дна разломов, обусловленных активными неотектоническими событиями. В Восточно-Сибирском море большинство потенциально газонасыщенных объектов распределено по глубинам до 300 м от морского дна, что обусловлено более спокойным

тектоническим режимом на поздних стадиях осадконакопления.

В морях Лаптевых, Восточно-Сибирском, Бофорта и Беринговом выявлены районы возможного существования газогидратов на основе выделения псевдодонного отражающего горизонта BSR (bottom simulating reflector) [1, 7].

В 2014–2025 гг. ИПНГ РАН проведен широкий комплекс геолого-геофизических исследований нового опасного явления – образования гигантских кратеров выбросов газа на суше и акваториях севера Западной Сибири (рис. 2) [1, 8–12]. Эти работы были инициированы обнаружением в 2014 г. гигантских кратеров на суше полуостровов Ямал и Гыданский, которых за 11-летний период было обнаружено и в разной степени изучено около 20. Во всех пяти случаях наблюдения выбросов газа (объекты С3, С11, С12, С21 и С23 в геoinформационной системе «Арктика и Мировой океан» – ГИС «АМО») очевидцами из коренного населения были зафиксированы его самовоспламенения, что повышает силу взрыва и его опасность для жизнедеятельности человека. В итоге комплексных исследований обоснован газодинамический генезис образования гигантских кратеров на суше Арктики, впервые сформулированный на уровне гипотезы в 2014 г., подразумевающий формирование газонасыщенных полостей в массивах подземного льда, бугров пучения и их взрывы [8–11].

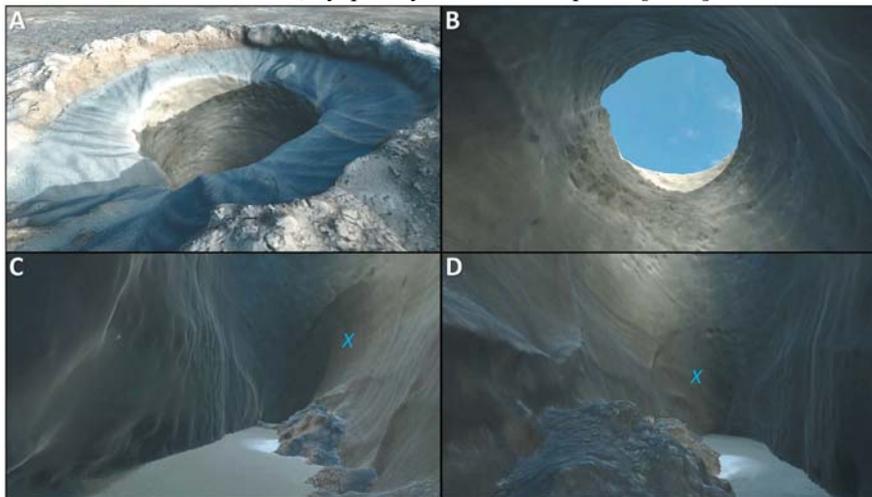


Рис. 2. Изображения объекта выброса газа С23 в виртуальной реальности: виды с поверхности земли (А) и дна полости (В, С, D), в том числе на западный (С) и восточный (D) гроты

При исследованиях взрывной дегазации Земли на суше и мелководном шельфе Арктики особо значимым является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса, вертолетов и

беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [8–11]. Фотограмметрическая обработка космо- и аэрофотоснимков позволяет строить цифровые модели рельефа местности и цифровые двойники изучаемых объектов, в том числе в виртуальной реальности (см. рис. 2), а также проводить мониторинг и прогноз изменений изучаемых объектов [1, 10, 11].

В итоге комплексных аэрокосмических и экспедиционных исследований в северной части Западной Сибири обнаружены 7783 зоны взрывной дегазации с многочисленными кратерами/покмарками на дне 4736 термокарстовых озер (6300 зон), 29 рек (139 зон) и 1344 участков мелководья Карского моря, в том числе в Байдарацкой, Обской и Тазовской губах [12]. Ранее подобные объекты и зоны дегазации Земли в большом количестве были открыты в Баренцевом море [13] и во многих других акваториях Мирового океана. Установлено, что на полуострове Ямал наиболее крупный Нейтинско-Сеяхинский район дегазации совпадает с центральной частью Ямальского грабен-рифта, а Сабеттинский район приурочен к Южно-Тамбейскому месторождению [12]. Крупные очаги дегазации, видимо, имеют связь с субвертикальной миграцией глубинного газа по проницаемым разломам и/или диссоциацией газогидратов в процессе развития таликов на непромерзающих до дна акваториях.

Впервые по данным ДЗЗ из космоса на дне арктических озер обнаружены крупные грязевулканические постройки с кратерами [1]. Исследованы причины и последствия катастрофических техногенных выбросов газа при бурении поисково-разведочных скважин в Арктике [1].

Результаты исследований способствуют повышению эффективности и экологической безопасности поиска и освоения ресурсов нефти и газа, а также уточнению прогноза климатических изменений.

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения ресурсов углеводородов шельфа и сопредельной суши арктических и субарктических регионов России в условиях меняющегося климата» (№ 125020501403-7).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Кишанков А.В. Геофизические методы обеспечения технологического суверенитета и национальной безопасности России в Арктике // Вестник РАН. 2024. Т. 94. № 10. С. 896–914.
2. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic) // Marine and Petroleum Geology. 2022. V. 138. 105527. P. 1–15.
3. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic

shelf (Laptev and East Siberian seas) // *Marine and Petroleum Geology*. 2023. V. 148. 106050. P. 1–15.

4. Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G. New Information on Subsea Frozen Ground in the Laptev and East Siberian Seas Based on Seismic Data // *Doklady Earth Sciences*. 2025. V. 521 (11). P. 1–9.

5. Рокос С.И., Костин Д.А., Тулапин А.В. и др. Мерзлые и охлажденные грунты акватории Байдарацкой губы // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2022. Вып. 9. С. 222–227.

6. Матвеева Т.В., Чазов А.О., Смирнов Ю.Ю. Геологическая характеристика подмерзлотного газогидратного резервуара на Притаймырском шельфе Карского моря (Восточная Арктика, Россия) // *Геотектоника*. 2024. Вып. 2. С. 84–108.

7. Богоявленский В.И., Кишанков А.В. Опасные газонасыщенные объекты на арктическом шельфе Восточной Сибири, Дальнего Востока (Россия) и Аляски (США) // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14. № 4. С. 478–487.

8. Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // *Горная промышленность*. 2020. № 1. С. 97–118.

9. Богоявленский В.И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. 2021. Т. 11. № 1. С. 51–66.

10. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Мониторинг развития Дуплетного объекта взрыва газа С22 на полуострове Ямал по данным дистанционного зондирования Земли // *Арктика: экология и экономика*. 2024. Т. 14. № 3. С. 320–333.

11. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Гаврилов А.А. Аномально быстрый рост и взрыв Ямальского бугра газодинамического пучения С23 в 2020–2024 годах // *Арктика: экология и экономика*. 2025. Т. 15. № 3. С. 4–17.

12. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Никонов Р.А. Взрывная дегазация Земли на севере Западной Сибири: суша и прибрежные части Карского моря // *Арктика: экология и экономика*. 2025. Т. 15. № 2. С. 162–176.

13. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor // *Science*. 2017. V. 356(6341). P. 948–953.

Fundamentally new information on the distribution of frozen ground and gas hydrates on the Arctic shelf has been obtained. The gas-dynamic genesis of the formation and explosions of perennial heave mounds with the formation of giant craters has been substantiated. In the north of Western Siberia, 7783 explosive degassing zones have been discovered (1344 in the shallow areas of the Kara Sea). Zones of man-made gas blowouts have been identified and studied.

**Вазюля С.В.¹, Дерягин Д.Н.¹, Павлова М.А.^{1,2},
Кравчишина М.Д.¹, Реджепова З.Ю.¹**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: svershova@mail.ru; ²Московский физико-технический институт (НИУ), г. Долгопрудный)

Алгоритм оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутникового сканера MODIS

**Vazyulya S.V.¹, Deryagin D.N.¹, Pavlova M.A.^{1,2},
Kravchishina M.D.¹, Redzhepova Z.U.¹**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny)

Algorithm for estimating suspended matter concentration in the Laptev Sea using MODIS data

Ключевые слова: региональный алгоритм, дистанционное зондирование, MODIS, концентрация взвеси, речной сток

На базе данных натуральных измерений концентрации взвеси в 2015, 2017 и 2018 гг. получены формулы для расчета этой биооптической характеристики по данным спутникового сканера цвета MODIS в море Лаптевых. Проанализированы параметры расчетных формул в зависимости от критериев отбора массива спутниковых данных, используемого для их получения.

В последние десятилетия в высоких широтах наблюдается наиболее выраженное изменение климата, следствием которого является увеличение речного стока [1] и поступления взвешенного вещества в арктические моря [2]. Данные дистанционного зондирования позволяют оценить концентрации взвеси TSM в поверхностном слое моря, исследовать межгодовую изменчивость распределений TSM в регионах, труднодоступных для проведения регулярных натуральных измерений. Алгоритмы для оценки TSM основаны на корреляции этой характеристики с величиной показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{br} [3]. В этой работе для расчета b_{br} по спутниковым данным использовались два способа: оценки b_{br_SIO} получены с помощью методики, первоначально разработанной в ИО РАН для Баренцева моря [4]; b_{br_QAA} – продукт полуаналитического алгоритма QAA [5].

Алгоритмы для оценки TSM по данным сканера цвета океана MODIS разработаны на основе данных натуральных измерений этой характеристики в поверхностном слое моря Лаптевых в 2015, 2017 и 2018 гг. Подбор спутниковых данных выполнен для ближайшего пикселя к точке отбора пробы, для измерения TSM . Интервал времени между судовыми и спутниковыми измерениями не превышал $\Delta T_{max} = 48$ ч. Исключались пиксели, отмеченные флагами STRAYLIGHT и CLDICE и имеющие

отрицательные значения коэффициента яркости моря для любого спектрального канала в видимом диапазоне [6]. Чтобы набор спутниковых данных для измерений в августе-сентябре в условиях частой облачности был достаточно большой, было решено расширить границу допустимых значений зенитного угла Солнца θ_{\max} до 75° . Всего удалось подобрать 97 пар данных b_{bp}/TSM для $b_{\text{bp_SIO}}$ и 94 – для $b_{\text{bp_QAA}}$.

Прежде всего, были проанализированы зависимости коэффициента детерминации R^2 линейной корреляции между величинами TSM и b_{bp} от критериев отбора массива спутниковых данных (рис. 1). Методика анализа такая же, как при разработке алгоритма оценки концентрации хлорофилла a [6]. В отличие от ситуации с данными VIIRS [7], для $\Delta T_{\max} \geq 6$ ч величина R^2 при использовании $b_{\text{bp_SIO}}$ заметно выше, чем для $b_{\text{bp_QAA}}$. Даже при $\Delta T_{\max} = 48$ ч для $b_{\text{bp_SIO}}$ величина R^2 больше 0.8. Также представленные результаты еще раз подтверждают достаточно хорошее качество данных дистанционного зондирования, полученных при зенитных углах Солнца вплоть до 75° [6, 7].

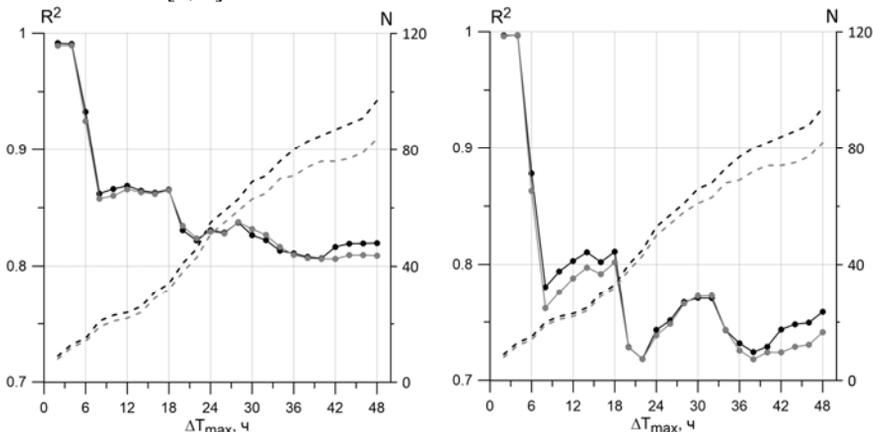


Рис. 1. Величины коэффициента детерминации R^2 линейной корреляции между величинами TSM и b_{bp} в логарифмическом масштабе (сплошные линии с кружочками) и количества пар N (пунктир) в зависимости от величины ΔT_{\max} для массивов данных b_{bp}/TSM с различными критериями отбора. Слева показаны результаты для $b_{\text{bp_SIO}}$, справа – для $b_{\text{bp_QAA}}$; черным цветом – $\theta_{\max} = 75^\circ$, серым – $\theta_{\max} = 70^\circ$.

Массив спутниковых данных для вычисления коэффициентов формулы расчета TSM должен быть достаточно представительным, при этом надо обеспечить приемлемое качество используемых спутниковых данных. Для всех исследуемых значений ΔT_{\max} величина коэффициента детерминации достаточно высокая. Рисунок 2 позволяет увидеть, как влияет величина ΔT_{\max} на итоговые оценки TSM . Прежде всего, заметно различие

получаемых оценок TSM при использовании одинаковых величин b_{bp} . Начиная с $b_{bp} = 0.005 \text{ м}^{-1}$, рассчитанные величины TSM при использовании формул для b_{bp_SIO} заметно выше, чем для b_{bp_QAA} . Влияние ΔT_{max} также зависит от того, какой продукт b_{bp} был использован. Но в обоих случаях для $\Delta T_{max} \geq 20$ ч этот параметр практически перестает влиять на получаемые оценки концентрации взвеси. Оценки TSM для двух значений θ_{max} практически совпадают.

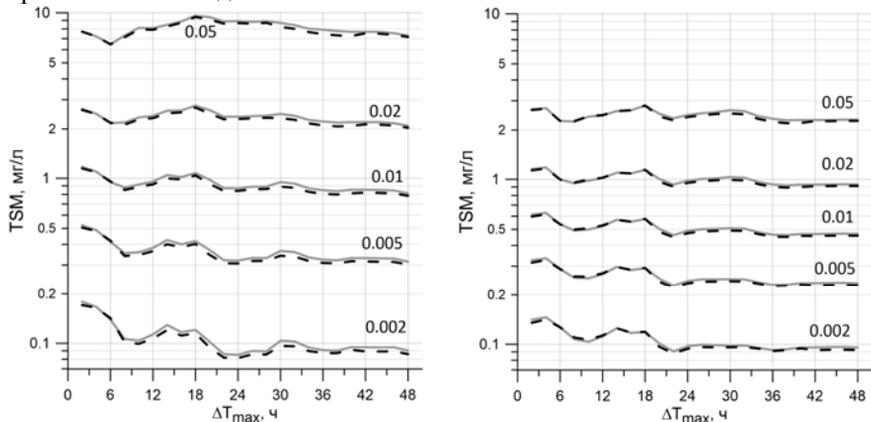


Рис. 2. Оценки TSM в зависимости от величины b_{bp} (указаны рядом с кривыми) и критериев отбора массивов, по которым получены формулы с использованием b_{bp_SIO} (слева) и b_{bp_QAA} (справа). Сплошными серыми линиями показаны зависимости для массивов спутниковых данных с $\theta_{max} = 70^\circ$, пунктиром – $\theta_{max} = 75^\circ$.

По результатам выполненного анализа решено использовать массив спутниковых данных с $\Delta T_{max} = 24$ ч. Таким образом, величины TSM можно рассчитывать по формуле

$$TSM = 670 \cdot (b_{bp_SIO})^{1.45}, \quad (1)$$

используя значения b_{bp_SIO} [4], или

$$TSM = 48.7 \cdot (b_{bp_QAA}), \quad (2)$$

через значения b_{bp_QAA} [5]. Коэффициенты детерминации для этих формул равны 0.83 и 0.74, соответственно. Обе формулы позволяют с достаточной точностью восстанавливать величины TSM по данным дистанционного зондирования (рисунок 3). Переход к массиву данных с $\Delta T_{max} = 48$ ч, не приводит к заметному расхождению между натурными и спутниковыми оценками TSM . На массиве данных с $\Delta T_{max} = 24$ ч медианные значения относительной ошибки для формул (1–2) составляют 44% и 39%, соответственно; а для $\Delta T_{max} = 48$ ч они равны 48% и 37%.

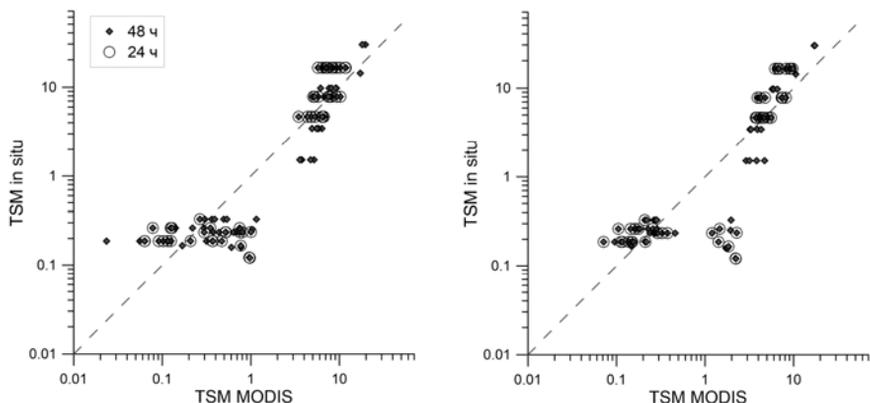


Рис. 3. Сопоставление величин TSM (мг/л), рассчитанных по данным MODIS и измеренных *in situ*. Расчеты TSM были выполнены с использованием b_{bp_SIO} (слева) и b_{bp_QAA} (справа). Пунктиром показана линия идеального соответствия 1:1.

Во всех вариантах расчета TSM по спутниковым данным есть точки, для которых получаемые оценки TSM значительно отличаются от измеренных *in situ*. Особенно много таких в области, где по данным натуральных измерений TSM не превышала 0.5 мг/л. Возможно это связано с плохим качеством спутниковых данных в этой ситуации и требует дальнейшего исследования.

Стоит отметить заметное отличие формулы (2) от аналогичной, полученной для спутникового сканера цвета океана VIIRS [7]. Это свидетельствует о том, что для каждого сканера желательно разрабатывать свой региональный алгоритм.

На базе данных судовых измерений концентрации взвешенного вещества созданы региональные алгоритмы для оценки TSM по данным спутникового сканера MODIS в море Лаптевых. Выполнен подробный анализ параметров точности расчетных формул в зависимости от критериев отбора используемого массива спутниковых данных. Показано, что возможно использование данных дистанционного зондирования с максимальным различием во времени измерения 48 часов, полученные при зенитных углах Солнца вплоть до 75° . Коэффициенты детерминации для итоговых формул расчета TSM через показатель рассеяния назад взвесью равен 0.83 и 0.74. Средние медианные относительные ошибки не превышают 50%.

Разработка алгоритма выполнена в рамках проекта, финансируемого грантом РФФИ № 25-27-00346. Данные судовых измерений получены в рамках государственного задания Минобрнауки для ИО РАН по теме №

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chalov S., Ivanov V. Catchment and in-channel sources in three large Eurasian Arctic rivers: Combining monitoring, remote sensing and modelling data to construct Ob', Yenisey and Lena rivers sediment budget // CATENA. 2023. V. 230. 107212.
2. Rusakov V.Y., Kuz'mina T.G., Lukmanov R.A. Assessment of the sediment budget of the Kara and Laptev seas // Continental Shelf Research. 2025. V. 292. 105506.
3. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В. и др. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ИО РАН, 2018. 140 с.
4. Буренков В.И., Ершова С.В., Копелевич О.В. и др. Оценка пространственного распределения взвеси в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // Океанология. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
5. Lee Z., Carder K., Arnone R. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 5755–5772.
6. Вазюля С.В., Аглова Е.А., Салинг И.В. и др. Алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* в море Лаптевых по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. (в печати).
7. Вазюля С.В., Дерягин Д.Н., Павлова М.А и др. Алгоритм оценки концентрации взвеси в море Лаптевых по данным спутникового сканера VIIRS // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы Материалы XXXI Международного симпозиума. Томск: Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, 2025.

Formulas for calculating total suspended matter concentration using data of ocean color satellite scanner MODIS in the Laptev Sea were obtained on the base of in situ measurements of this bio-optical characteristic in 2015, 2017 and 2018. The parameters of the calculation formulas were analyzed depending on the criteria for selecting the satellite data set used to obtain them.

Васильев А.А., Облогов Г.Е., Широков Р.С.

(Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, e-mail:
a.a.vasiliev@gmail.com)

Карта субаквальной мерзлоты Баренцева и Карского морей Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Shirokov R.S.

(Earth Cryosphere Institute of TyumSC SB RAS, Tyumen)

Submarine Permafrost Map of Barents and Kara Seas

Ключевые слова: субаквальная мерзлота, кровля мерзлоты, база данных, Баренцево и Карское моря.

Разработана база сейсмических и буровых данных распространения и условий залегания субаквальной мерзлоты Баренцева и Карского морей. Всего выявлено более 24 000 точек проявления мерзлоты в указанной акватории. В ГИС формате построена карта распространения и глубины залегания кровли мерзлоты. Статистический анализ показал погружение кровли мерзлоты с запада на восток. Установлена тесная связь глубины залегания кровли мерзлоты со временем перехода территорий в субаквальное состояние. Скорость деградации субаквальной мерзлоты в голоцене составила 2.5...4.5 мм/год. Скорость деградации подводной мерзлоты ускорилась на фоне потепления климата и повышения температуры придонного слоя воды.

Субаквальные многолетнемерзлые породы (СММП) на шельфе арктических морей остаются малоизученным природным феноменом, несмотря на усилия, прикладываемые научным сообществом. Изучение СММП представляет большой практический и научный интерес в связи с тем, что на шельфе арктических морей выявлены перспективные месторождения нефти, газа и газового конденсата. Особый интерес исследование СММП представляет для оценки потоков парниковых газов, заключенных в толще СММП, при их деградации [3, 6]. Отдельную проблему представляет собой изучение потоков газа за счет разложения газовых гидратов на шельфе при деградации СММП.

Многолетнемерзлые породы на шельфе формируются и сохраняются в результате промерзания отложений во время регрессий и последующей трансгрессии (реликтовая мерзлота), при переходе участков суши из континентальных к субаквальным условиям.

Прямые наблюдения за условиями залегания, мощностью, состоянием и температурным режимом СММП чрезвычайно ограничены. К настоящему времени в Баренцевом и Карском морях пробурены всего 21 скважина, которые вскрыли СММП. При этом большинство скважин расположено в прибрежной мелководной акватории морей.

Одновременно развитие получают геофизические методы изучения СММП, среди которых наибольшую перспективу имеют высокоразрешающие сейсмические методы [1, 4, 5]. Сейсмоакустическое

профилирование повсеместно используется для изучения и картирования геологического строения шельфа. К настоящему времени в акваториях арктических морей накоплен значительный объем сейсмоакустических профилей.

Картирование СММП прошло несколько этапов. Сначала карты строились на основе экспертных оценок с учетом имеющихся данных об истории развития шельфа, его морфологии, температуре воды в арктических морях. По мере поступления фактических результатов бурения скважин, вскрывших мерзлоту, и привлечения данных сейсмопрофилирования, разными авторами предложена серия карт СММП, в разной мере учитывающих фактические данные. Наконец, как особый вид исследования и картирования СММП, можно отметить активно развивающееся математическое моделирование условий формирования, эволюции и деградации СММП.

Для построения карты СММП, основанной на фактических данных, были собраны все опубликованные и архивные данные по скважинам, вскрывшим мерзлые породы в Баренцевом и Карском морях, определены их координаты, глубины моря и глубины залегания кровли и подошвы (если скважины прошли всю толщу мерзлых пород), состав пород, льдистость и температура СММП (при наличии). Для оценки распространения и глубины залегания кровли были использованы многочисленные данные сейсмоакустического профилирования в Баренцевом и Карском морях. Всего были проанализировано около 200 тыс. пог. км профилей. Заверка данных сейсмоакустического профилирования и бурения на шельфе на примере бурового профиля в районе мыса Харасовэй и в море Лаптевых показала хорошую сходимость. В результате интерпретации сейсмоакустических профилей установлены участки уверенного прослеживания сейсмоакустических маркеров СММП, а также области предполагаемого их развития. Достоверность определения распространения СММП по данным сейсмоакустического профилирования подтверждается тем обстоятельством, что ни по одному из проанализированных профилей не были найдены сейсмоакустические маркеры, ассоциирующиеся с СММП, на глубинах моря больших 114 м. Это полностью соответствует современным представлениям об осушении шельфа во время последнего оледенения до изобаты 120 м и формированию мерзлых пород на осушенном шельфе.

База данных об участках проявления и глубинах залегания СММП организована в формате атрибутивной таблицы ГИС-проекта программы QGIS, который позволяет проводить пространственный анализ информации. В атрибутивную таблицу включены и все данные по буровым скважинам. В таблице содержатся идентификационные номера точек, в которых обнаружены СММП, географические координаты, глубина моря, глубина залегания верхней границы СММП от поверхности моря и от поверхности

морского дна. Всего в базе данных содержится более 24500 записей, содержащих информацию о проявлении СММП по сейсмическим и буровым данным. В качестве координатной системы ГИС-проекта была выбрана равновеликая азимутальная проекция Ламберта (WGS 84 / North Pole LAEA Russia), которая наиболее удобна для картографического представления СММП Российской Арктики. Впрочем, созданную карту легко перевести в любую другую проекцию. Образ карты представлен на рис. 1.

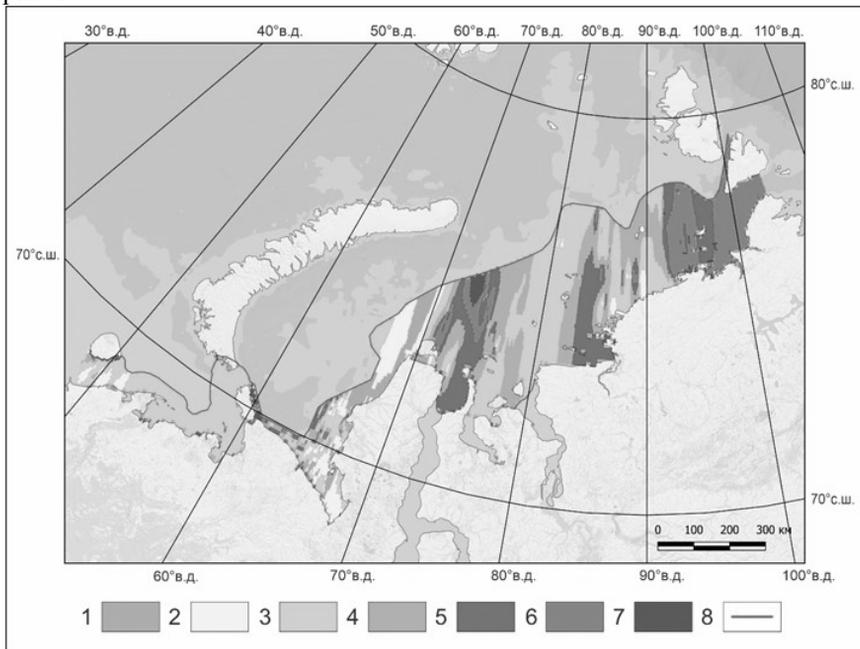


Рис. 1. Образ карты распространения и глубины залегания кровли СММП. В легенде: 1-7 – глубина залегания кровли СММП от поверхности морского дна, м: 1 – 0–5, 2 – 5–10, 3 – 10–20, 4 – 20–30, 5 – 30–40, 6 – 40–50, 7 – более 50, 8 – граница распространения СММП.

Область распространения СММП в Баренцевом и Карском морях показана линией, ограничивающей ареал проявления мерзлоты по данным скважин и сейсмоакустических профилей. Эта линия представляет собой северную границу распространения подводной мерзлоты в Западной Арктике. Нигде к северу от этой границы СММП не обнаружены.

Граница распространения СММП, установленная на основе данных морского бурения и сейсмоакустического профилирования, сопоставлена с морфоструктурой шельфа. Сравнение выполнено для акватории Карского моря, для которого есть детальная геоморфологическая карта. На

геоморфологическую карту была нанесена граница распространения СММП. Для западной части моря наблюдается полное совпадение морфоструктур и границы СММП, но уже к северу от 74° с.ш., границы СММП, хотя и следуют в целом рисунку морфоструктур, но пересекают основные морфоструктурные элементы.

Баренцево море характеризуется наименьшей глубиной залегания кровли СММП – 13.3 ± 6.6 м при средней глубине моря в области распространения мерзлоты 23 м. В юго-западной части Карского моря средняя глубина составляет 16.7 ± 8.1 м. Средняя глубина моря здесь около 22 м. Наибольшая глубина залегания СММП наблюдается в северо-восточной части Карского моря – 29.5 ± 15.5 м при средней глубине моря около 42 м.

Принимая во внимание известный ход повышения уровня мирового океана в постгляциальное время, можно рассчитать время нахождения в субаквальном состоянии (время затопления). Мы сопоставили данные глубин залегания кровли СММП по Баренцеву и Карскому морям с временем затопления с учетом данных [2] по морю Бофорта и морю Лаптевых (рис. 2).

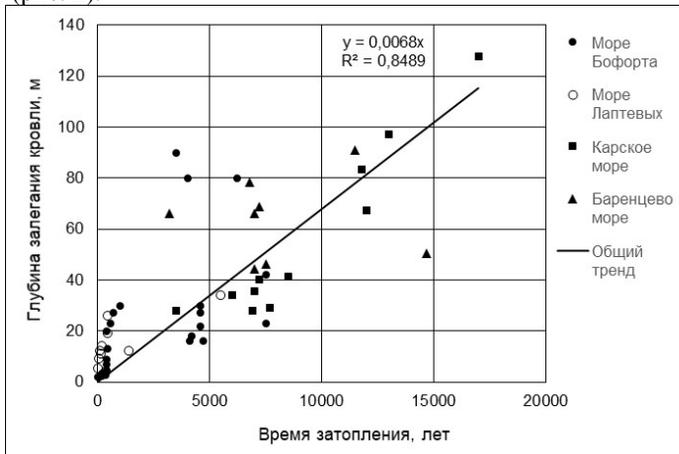


Рис. 2. Соотношение глубины залегания кровли субаквальных многолетнемерзлых пород и времени затопления.

Установлено, что средняя скорость деградации мерзлоты сверху в голоцене составляет 4.2 мм/год для Баренцева моря и 2.5 мм/год для Карского моря. Очевидно, что скорость деградации СММП увеличивается на фоне потепления климата.

Таким образом, на основе сейсмоакустических и буровых данных разработана база данных и цифровая карта распространения и глубины залегания СММП Баренцева и Карского морей.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRZ-2021-0005).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекант П.В., Васильев А.А. Распространение субаквальных многолетнемерзлых пород в Карском море // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 72–75.
2. Angelopoulos M., Overduin P.P., Miesner F. et al. Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost // Permafrost and Periglac. Process. 2020. V. 31. № 3. P. 442–453.
3. Bogoyavlensky V.I., Kishankov A.V., Kazanin A.G. New Information on Subsea Frozen Ground in the Laptev and East Siberian Seas Based on Seismic Data // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 521 (11). P. 1–9.
4. Overduin P.P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP) // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. № 6. P. 3490–3507.
5. Rekant P., Cherkashev G., Vanstein B. et al. Submarine permafrost in the nearshore zone of the southwestern Kara Sea // Geo Mar. Lett. 2005. V. 25. P. 183–189.
6. 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 // Phil. Trans. R. Soc. A. 2015. V. 373. 20140451.

A database of the Permafrost distribution and Permafrost Table Position in the Barents and Kara Seas has been developed on the base of seismic and drilling data. A map of the distribution and Permafrost Table Position has been designed in GIS format. Statistical analysis showed the permafrost roof sinking from west to east. A close relationship has been established between the depth of the permafrost and the inundation times. The rate of permafrost degradation in the Holocene was 2.5...4.5 mm/year. The rate of offshore permafrost degradation accelerated under climate warming and an increase in the temperature of the sea bottom water.

**Верзбицкий В.Е.¹, Соколов С.Д.², Тучкова М.И.²,
Малышев Н.А.¹**

(¹ПАО «НК «Роснефть», г. Москва, e-mail: v_verzhbitskiy@rosneft.ru; ²Геологический институт РАН, г. Москва)

**Геология острова Врангеля – ключ к пониманию эволюции
шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей
Verzhbitskiy V.E.¹, Sokolov S.D.², Tuchkova M.I.²,
Malyshev N.A.¹**

(¹Rosneft Oil Company, Moscow; ²Geological Institute RAS, Moscow)

**Geology of Wrangel Island – a key for understanding of
evolution of East Siberian and Chukchi Sea shelf**

Ключевые слова: остров Врангеля, этапы структурной эволюции, складчато-надвиговая тектоника, рифтинг, шельф Восточной Арктики

В докладе приводится синтез результатов экспедиционных исследований по острову Врангеля. Рассматриваются результаты изучения геологических комплексов докембрийского, палеозойского и триасового возраста, а также этапы их структурно-тектонической эволюции на основе мезоструктурного анализа. Полученные результаты необходимо учитывать при интерпретации данных сейсморазведки и прогнозе нефтегазовых систем прилегающего шельфа Восточно-Сибирского и Чукотского морей.

Остров Врангеля расположен между акваториями Восточно-Сибирского и Чукотского морей, в пределах которых выделяется ряд крупных осадочных бассейнов, по совокупности геолого-геофизических и геохимических данных обоснованно считающихся перспективными на поиски месторождений нефти и газа. Традиционно для интерпретации сейсмических данных по российскому сектору Чукотского и Восточно-Сибирского морей привлекались опубликованные данные бурения поисковых скважин на шельфе Аляски. В результате в российском секторе выделялись те же мегасеквенции, что и для нефтегазоносного бассейна Арктической Аляски (элмирская, бофортская и брукская). В первом приближении данный подход обоснован, но для детальной расшифровки геологии шельфа необходимо также использовать материалы, имеющиеся по острову Врангеля. В его строении принимают участие комплексы докембрийских, силурийско-пермских и триасовых пород. Ранее на севере острова описывались верхнемеловые – палеогеновые отложения, но последними работами специалистов ГИН РАН они были отнесены к четвертичным. В данной работе используются результаты полевых работ 2006 и 2014 гг., а также предшествующих экспедиций [1, 2].

Одним из важнейших результатов полевых исследований является установление (прежде всего – по геолого-структурным данным) проявления

элсмирской орогении во второй половине девона – начале карбона [3–6], что свидетельствует о развитии фундамента этого возраста на шельфе к северу от зоны фронтальных надвигов. Это также указывает на схожесть возраста основания чехла осадочных бассейнов северного сектора Восточно-Сибирского и Чукотского морей с нефтегазоносным бассейном Арктической Аляски. Возраст основного этапа складчато-надвиговых (коллизийных) деформаций на острове Врангеля, сформировавший генеральный складчато-надвиговой структурный план северной вергентности, датирован в диапазоне поздней юры – конца раннего мела [7]. Последний примерно соответствует интервалу накопления аналогов бофортского комплекса, а его окончание отвечает времени формирования раннеапского несогласия – реперной границы на шельфе Восточной Арктики, выделяемой в основании сейсмокомплекса – возрастного аналога брукской мегасеквенции. В последнее время появились свидетельства о проявлении на острове этапа деформации (структурообразования) в средне-позднепермское время, на что указывает наличие конгломератов этого возраста в разрезе центральной тектонической зоны острова [8]. Отдельный этап сжатия, идентифицированный по локально развитым субмеридиональным складкам, наложенным на генеральный субширотный структурный план острова, был отнесен к концу мела – палеоцену [3], что соответствует времени формирования регионального среднебрукского несогласия на шельфе. Возраст последнего был впервые обоснован в результате проведения стратиграфического бурения 2022–2023 гг. в российском секторе Чукотского моря к северо-востоку от острова Врангеля [9]. Этап постскладчатого растяжения был задокументирован во всех дочетвертичных комплексах острова [3], а устойчивая правосторонняя компонента хорошо соотносится с кинематикой эоценовой субширотной зоны правосторонней трансенсии Умки в центральной части Восточно-Сибирского моря [10]. Очевидно, что информация по этапам структурной эволюции геологических комплексов острова должна учитываться как при интерпретации данных сейсморазведки для прилегающих акваторий Восточной Арктики, так и при проведении бассейнового моделирования.

В заключение отметим, что принципиально новые данные о возрастах, литолого-фациальном составе и элементах углеводородных систем осадочных комплексов, выделяемых на российском шельфе Восточной Арктики, в ближайшее время можно ожидать по результатам проводимого анализа керна скважин стратиграфического бурения. Данный проект был реализован в последние годы (2020–2024 гг.) в северной части Карского моря, в также в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском [9, 11–14].

Исследования сотрудников ГИН РАН проведены при финансовой поддержке проекта РНФ №25-17-00036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косью М.К., Авдюннчев В.В., Ганелнн В.Г. и др. Остров Врангеля: геологическое строение, минераленания, геозкология. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. Т. 200. 137 с.
2. Kos'ko M.K., Cecile M.P., Harrison J.C. et al. Geology of Wrangel Island, between Chukchi and Siberian Seas, Northeastern Russia. Geological Survey of Canada Bulletin, 1993. № 461. 102 p.
3. Вержбнцкнй В.Е., Соколов С.Д., Тучкова М.И. Современная структура и этапы тектонической эволюции острова Врангеля (Российская Восточная Арктика) // Геотектоника. 2015. № 3. С. 3–35.
4. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Моисеев А.В., Вержбнцкнй В.Е., Малышев Н.А., Гушина М.Ю. Тектоническая зональность острова Врангеля (Арктика) // Геотектоника, 2017. № 1. С. 3—18.
5. Соколов С.Д., Тучкова М.И., Вержбнцкнй В.Е., Малышев Н.А. Тектоническая позиция, строение и происхождение Северо-Чукотского бассейна (Восточная Арктика) // Геотектоника, 2025 (в печати).
6. Моисеев А.В., Соколов С.Д., Тучкова М.И. и др. Этапы структурной эволюции осадочного чехла о. Врангеля, Восточная Арктика // Геотектоника. 2018. № 5. С. 1–17.
7. Тучкова М.И., Соколов С.Д., Моисеев А.В., Ватрушкина Е.В. ⁴⁰AR/³⁹AR-возраст формирования складчатости в осадочных комплексах Чукотки и острова Врангеля (северо-восток России) // Доклады Академии наук. Науки и Земле. 2024. Т. 514. № 2. С. 227–236.
8. Тучкова М.И., Филимонова Т.В., Исакова Т.Н. и др. Новые данные о позднепалеозойских конгломератах острова Врангеля и их геологическая интерпретация // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2025. Т. 33. № 2. С. 59–80.
9. Малышев Н.А., Вержбнцкнй В.Е., Колубакнн А.А. и др. Технологические аспекты и опыт стратиграфического бурения в морях российской Арктики // Геология нефти и газа. 2024. № 3. С. 19–30.
10. Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российских шельфов // Труды Геологического института. Вып. № 632 / Отв. ред. Н.Б. Кузнецов. М.: ГИН РАН, 2022. 156 с.
11. Малышев Н.А., Вержбнцкнй В.Е., Скарятнн М.В. и др. Стратиграфическое бурение на севере Карского моря: первый опыт реализации проекта и предварительные результаты // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 3. С. 311–326.
12. Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Первые результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения окраинных структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного

Ледовитого океана // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 2. С. 100–110.

13. Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Данилкин С.М. и др. Стратиграфическое бурение на северо-востоке моря Лаптевых: основные результаты и дальнейшее развитие проекта // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 2. С. 160–179.

14. Темботов З.А., Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., и др. Геохимическая характеристика органического вещества мел-кайнозойских нефтегазоматеринских толщ северо-восточной части моря Лаптевых по результатам малоглубинного стратиграфического бурения // Геология и геофизика. 2025. Т. 66. № 8. С. 1042–1055.

The paper presents the synthesis of results of geological field works on Wrangel Island. The results of studies of geological complexes of Precambrian, Paleozoic and Triassic age, as well as their stages of structural-tectonic evolution, identified based on mesostructural analysis, are considered. The results are to be taken into consideration for interpretation of seismic data and forecast of petroleum systems for adjoining East Siberian and Chukchi Sea shelf.

Гаврилов А.В.¹, Малахова В.В.², Пижанкова Е.И.¹

(¹МГУ, геологический ф-т, Москва, e-mail: gavrilov37@bk.ru; ²ИВМиМГ СО РАН, Новосибирск, e-mail: malaxv@list.ru)

Криолитозона поднятия Де Лонга (шельф Восточно-Сибирского моря) по данным численного моделирования

Gavrilov A.V., Malakhova V.V., Pizhankova E.I.

(¹MSU, Geological Faculty, Moscow; ²ICM&MG SB RAS, Novosibirsk)

Cryolithozone of the De Long Rise (shelf of the East Siberian Sea) based on numerical modeling data

Ключевые слова: криолитозона, поднятие Де Лонга, мощность мерзлых пород, термометрия, численное моделирование

Представлены результаты сопоставления материалов численного моделирования современного состояния криолитозоны поднятия Де Лонга при различном тепловом потоке из недр с данными термометрии в скважине DL-1 при глубине моря 47 м, полученными в рамках проекта стратиграфического бурения, ПАО “НК “Роснефть”.

В 2021 г. авторами настоящей публикации было проведено численное моделирование для района о. Беннетта, расположенного в пределах поднятия Де Лонга [1]. Эндогенные процессы проявлены здесь наиболее ярко. Кроме частой повторяемости извержений газов (152 события за период 1973–1986 гг., а также в 2008 и 2013 г.), району свойственна высокая сейсмичность (зафиксировано восемь землетрясений магнитудой 4.2–5.0 с 1973 по 2007 гг.), а также активность геоморфологических процессов на островах Де Лонга. Перечисленное может свидетельствовать о повышенном тепловом потоке из недр. В соответствии с [2], были заданы два крайних значения плотности теплового потока: 75 мВт/м² (для тектонически активных блоков поднятия Де Лонга) и 60 мВт/м² (для менее активных блоков).

Палеогеографический сценарий истории развития за последние 200 тыс. лет строился в виде кривой эволюции температуры поверхности пород. Она задана на основе палеотемпературных реконструкций приморских низменностей севера Якутии и Новосибирских островов, наложенных на глобальную палеотемпературную ритмику Восточной Антарктиды. Показатели водно-физических и теплофизических свойств пород выбирались из литературных данных. Для расчета теплового состояния многолетнемерзлых пород (ММП) использовалась одномерная модель теплофизических процессов в донных отложениях с учетом фазовых переходов между мерзлыми и тальми породами.

По результатам моделирования при тепловом потоке 60 мВт/м², мощность мерзлоты составила 280–290 м (рис. 1). При теплопотоке 75 мВт/м² мерзлые толщи полностью деградируют при глубинах моря 40 м

около 4 тыс.л.н., при глубинах 5 м – около 2 тыс.л.н. Таким образом, расчеты показывают, что на шельфе 76–77°с.ш. могут существовать субмаринные талики. При этом, не только на внешнем и среднем шельфе, затопленных 9–13 тыс. л. н., но и на мелководьях. Полученные результаты кардинально расходятся с рядом ранее выполненных исследований крупных секторов шельфа, когда учет влияния блоковой тектоники не производится.

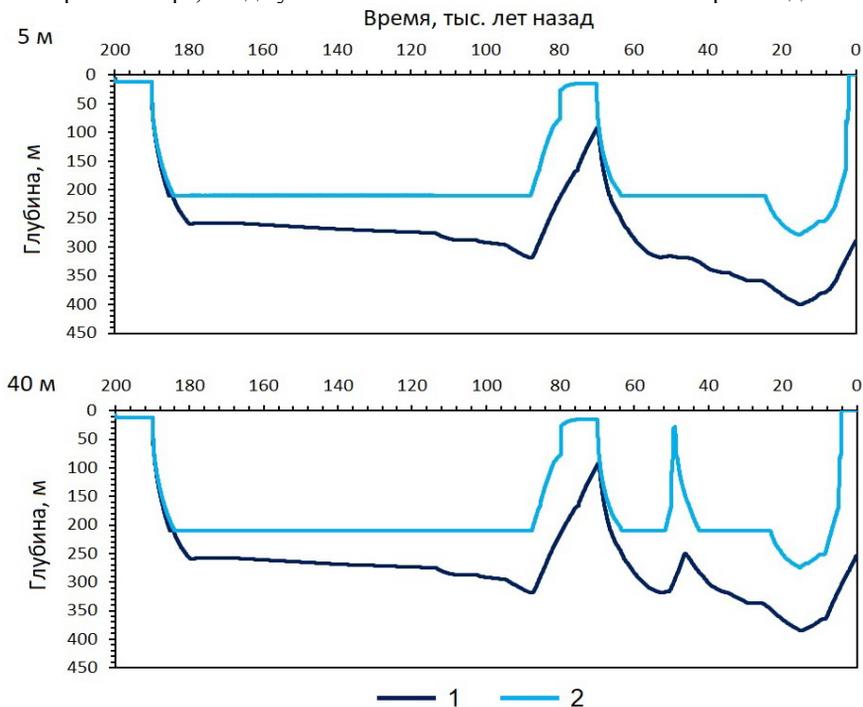


Рис. 1. Результаты численного моделирования эволюции подошвы мерзлых пород при тепловом потоке: 1 – 60 мВт/м²; 2 – 75 мВт/м²

В 2022 г. была пробурена первая скважина (DL-1) в рамках реализации программы малоглубинного стратиграфического бурения, направленной на создание эффективной технологии построения стратиграфических моделей малоизученных осадочных бассейнов Восточно-Сибирского сектора Арктики [3].

Скважина DL-1 располагается также в пределах подводного поднятия Де Лонга при глубине моря 47 м (забой в 472 м от дна, рис. 2). В геологическом разрезе выделяются две основные толщи пород. Верхняя – от поверхности дна до глубины 130 м, – представляет собой чехол, состоящий из горизонтально залегающих слоев нелигифицированных глин, алевролитов и песков с включением гравия, галек, валунов и раковинного детрита. К

интервалу 130–184.5 м приурочены напорные термальные воды. Водовмещающие породы представлены рыхлыми песчано-гравийными отложениями с валунами. Нижняя толща (184.5–268 м) – это коренные породы юрско-мелового возраста: аргиллиты, слабо литифицированные алевролиты с отдельными горизонтами песчаников, включениями гравия, гальки и щебня. Породы дислоцированы и раздроблены.

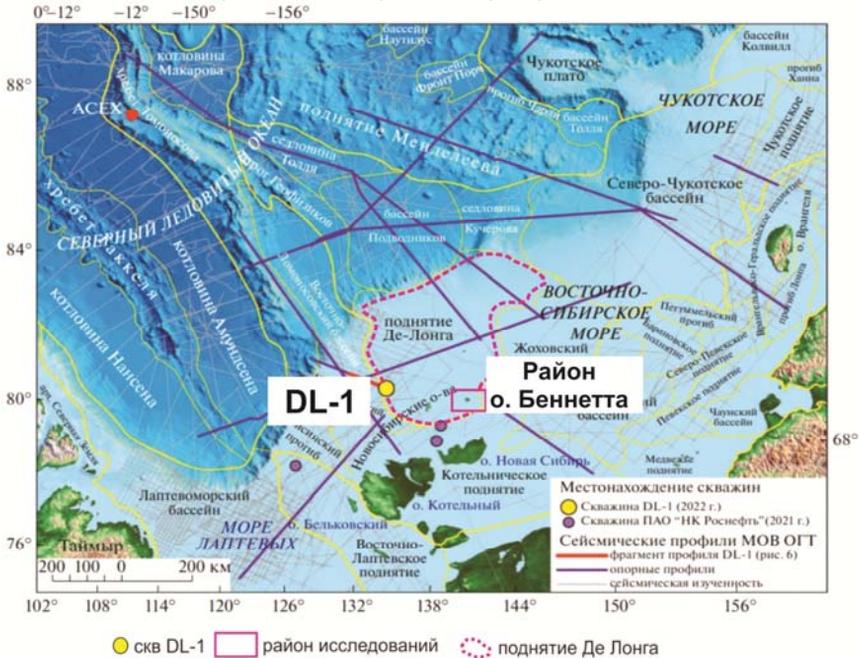


Рис. 2. Взаиморасположение района исследований 2021 г. (близ о. Беннетта) и скважины DL-1 (картографическая и геолого-структурная основа по [3] с дополнениями).

Скважинная термометрия выполнена до глубины 246 м с помощью технологии DTS (distributed temperature sensing). Это, собственно, первый опыт проведения термометрии в ходе работ в соответствии с программой стратиграфического бурения и он не может быть лишен недостатков. Первый из них – еще в ходе работ на буровой площадке выяснилось недостаточность времени выстаивания скважины (рис. 3) [4].

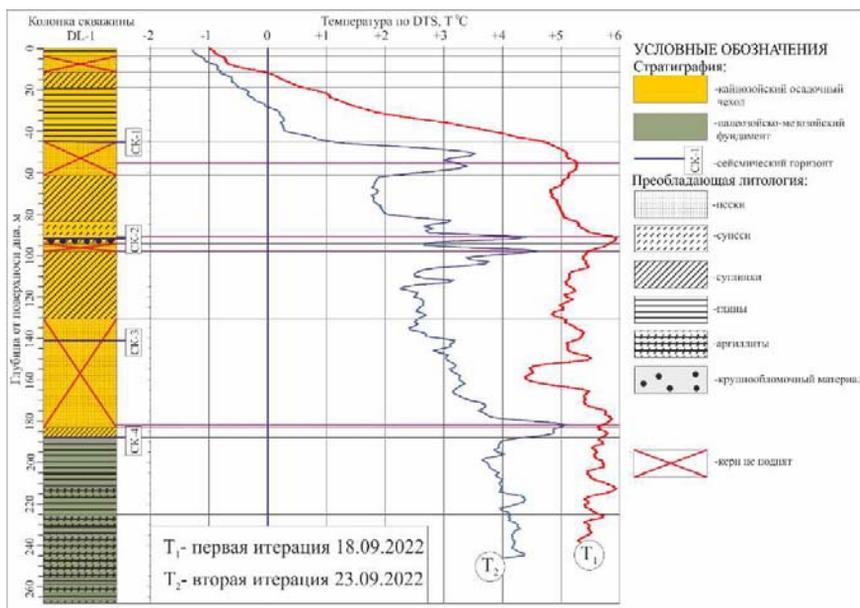


Рис. 3. Итоги термометрии в скважине: сразу после бурения и спустя 5 дней по его окончании [4].

Во-вторых, измеренная температура, варьирующая от -1.3°C до $+5^{\circ}\text{C}$ (рис. 3) не дает возможности определить состояние пород (талое, мерзлое). Необходимы еще данные о температуре начала замерзания поровой влаги. Но ее определение, как и вообще опробование пород для получения данных обо всех водно-физических и теплофизических свойствах программой стратиграфического бурения не предусмотрено. Это необходимо поправить: под геотермией понимается весь комплекс исследований теплового состояния, тепловых процессов и тепловых свойств горных пород.

Заключение. Вышеперечисленное показывает, что термометрия проведена в скважине (DL-1), температурный режим которой не восстановился после бурения. Однако, для валидации результатов моделирования современного состояния криолитозоны района близ о. Беннетта 2021 г. исключительно для изобат 40 м и более ее использовать можно, учитывая данные [5, 6]. Согласно последним, для изобат 40 м и более на шельфе Восточной Сибири характерно подавляющее распространение пластично-мерзлых тонкодисперсных и насыщенных соленой водой грубодисперсных и полускальных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов А.В., Малахова В.В., Пижанкова Е.И., Попова А.А.

Криолитозона внешнего шельфа Восточно-Сибирского шельфа и ее связь с вулканогенными явлениями // XII Межд. науч.-практ. конф. «Морские исследования и образование» MARESEDU-2021. Труды конф. Т. IV. С. 53–57.

2. Davies J.H. Global map of Solid Earth surface heat flow // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2013. V. 14. № 10. P. 4608–4622.

3. Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // *ДАН. Науки о Земле.* 2023. Т. 512. № 2. С. 261–271. DOI: 10.31857/S268673972360100X

4. Тулапин А.В., Рокос С.И., Длугач А.Г. и др. Гидрогеологический фактор и его возможное влияние на температурные измерения в скважинах (опыт термометрических исследований в акватории Восточно-Сибирского моря) // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России.* 2022. Вып. 9. С. 272–278. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-272-278.

5. 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.

6. Богоявленский В.И., Кишанков В.И., Казанин А.Г. Новая информация о субаквальной мерзлоте в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском по данным сейсморазведки // *ДАН. Науки о Земле.* 2025. Т. 521. № 2. С. 196–206. DOI: 10.31857/S2686739725040046

The article presents the results of comparison between the numerical modeling materials of the current state of the cryolithozone of the De Long rise with different heat flows from the subsoil and thermometry data in the DL-1 well at a sea depth of 47 m, obtained within the framework of the stratigraphic drilling project of PJSC NK Rosneft.

Горбарев А.А.^{1,2}

(¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток; ²Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток; e-mail: napisatantonu@gmail.com)

Икаит в донных осадках Чукотского моря: современное состояние изученности

Gorbarev A.A.^{1,2}

(¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok; ²Far Eastern Federal University, Vladivostok)

Ikaite in bottom sediments of the Chukchi Sea: a current state of knowledge

Ключевые слова: икаит, Чукотское море.

Обсуждены все опубликованные находки икаита в донных осадках Чукотского моря по состоянию на 2025 г. На основе обобщения имеющихся данных сделаны выводы о региональных особенностях распространения, состава и формирования этого минерала.

Икаит – метастабильный водный карбонат кальция. Формируется в четвертичных отложениях при низких температурах от -2 до $+7$ °С. К факторам, которые влияют на его кристаллизацию и устойчивость, относят повышенное содержание сульфат-иона, фосфат-иона, иона магния, а также щелочность (высокий pH). При дестабилизации минерал разлагается на безводные карбонаты кальция. Псевдоморфозы безводных карбонатов кальция по икаиту чаще всего называют глендонитами.

Открытие икаита в природных условиях произошло относительно недавно, в 1962 г. С тех пор интерес к нему и глендонитам нарастал [1, 2]. Это связано с их индикационной значимостью. Икаит и глендониты считаются маркерами холодного климата и используются в палеоклиматических исследованиях. Кроме того, они содержат в своем составе углерод, источником которого могут быть органическое вещество и/или метан. Соответственно, находки икаита интересны в рамках изучения цикла углерода и потоков метана, особенно в Арктике, в связи с фиксируемым потеплением климата.

По состоянию на 2025 г. в Чукотском море известно три опубликованные находки икаита и глендонитов (рис. 1).

Первая находка икаита/глендонитов сделана С.А. Элиасом с соавторами [3] (рис. 1). В публикации дано краткое описание (кристаллы янтарного цвета размером до 0.5 см) без подтверждающих аналитических данных. В качестве вмещающих указаны преимущественно песчаные отложения, вскрытые виброкорером в восточной (американской) части Чукотского моря [3, 6]. Отложения имеют охристый цвет за счет присутствия гидроксидов

железа и содержат тонкие прослои, богатые органическим веществом и фоссилиями неморского происхождения. Находки икаита сделаны в трех ядрах, причем неясно, в каких именно, так как соответствующий горизонт песчаных отложений отмечен в восьми ядрах [3, 6].

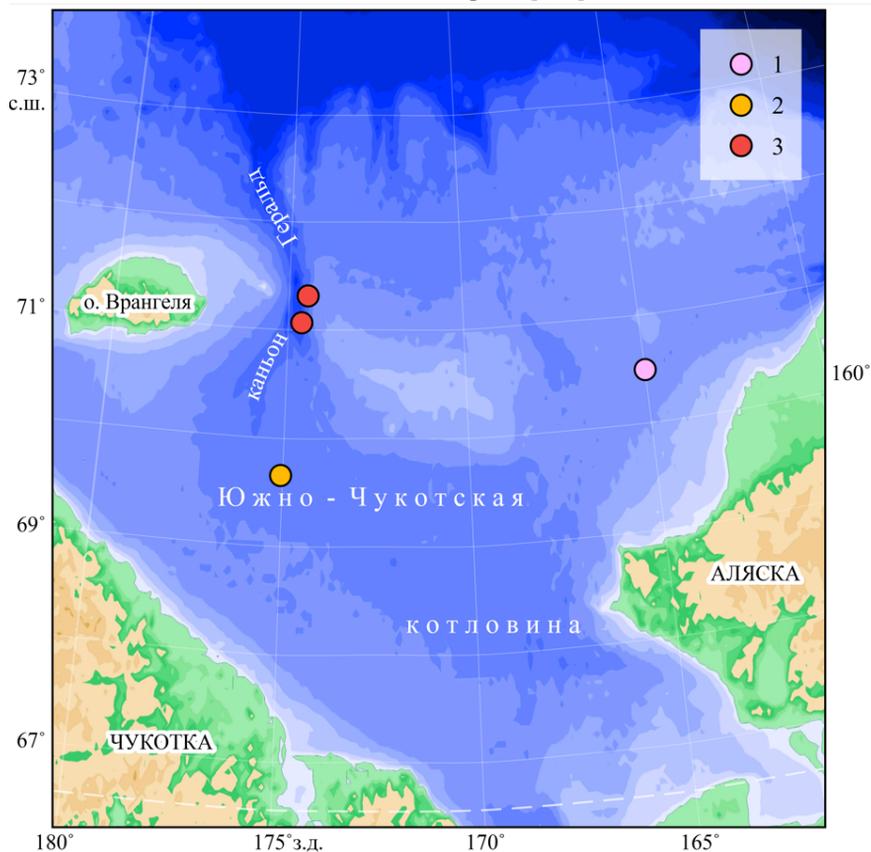


Рис. 1. Карта Чукотского моря со станциями отбора донных осадков, содержащих икаит/глендониты: 1 – [3], 2 – [4], 3 – [5].

Вторая находка описана А.А. Крыловым с соавторами в донных осадках юго-западной (российской) части Чукотского моря в пределах Южно-Чукотской котловины [4] (рис. 1). Икаит представлен кристаллами желтовато-бурого цвета размером до 10 см с четкой спайностью и нестабильной массой того же цвета внутри (рис. 2а). Кристаллы найдены на поддонном горизонте 200–230 см. Вмещающие осадки представлены газонасыщенными морскими алевропелитовыми илами серого, оливково-серого цвета. Присутствие икаитовой фазы подтверждено

рентгеноструктурными исследованиями: показана последовательная трансформация икаита в кальцит через ватеритовую фазу, происходящая при комнатных условиях. Кроме того, установлено, что газовая составляющая осадков, вмещающих икаит, состоит преимущественно из метана с примесью этана. Измеренные значения $\delta^{13}\text{C}-\text{CH}_4$ уменьшались от -82.7 до -91.3 ‰ PDB на поддонном горизонте от 15 до 205 см. Изотопный состав двух образцов икаита, проанализированный после их трансформации в кальцит, составил $\delta^{13}\text{C}$ -31.2 ‰ и -27.9 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ -3.2 и 1 ‰ PDB. Сделан вывод о том, что анаэробное окисление метана не играло основную роль в процессе формирования икаита, несмотря на четкую приуроченность находок кристаллов к газонасыщенным осадкам; значительная доля углерода поступила при деструкции органического вещества [4].

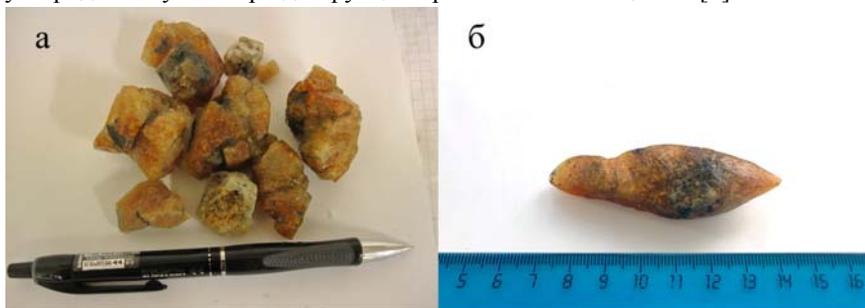


Рис. 2. Общий вид образцов икаита из Чукотского моря: а – [4] (фотография предоставлена А.А. Крыловым), б – [5] (фотография предоставлена О.Н. Колесник).

Третья находка икаита сделана О.Н. Колесник с соавторами на двух станциях в каньоне Геральд: одна южнее на поддонном горизонте 312–315 см (условно южная станция), другая – севернее на поддонном горизонте 86–88 см (условно северная станция) [5] (рис. 1). Икаит представлен единичными кристаллами янтарного цвета с темными вкраплениями, размер кристаллов – 5 см и 7.5 см (рис. 2б). Вмещающие осадки оливково-серые, серые до черного, газонасыщенные, со следами биотурбации и редкими включениями целой и битой ракушки разной степени сохранности. Они однозначно голоценовые, поскольку мощность голоценовой толщи в осевой части каньона Геральд и примыкающей части Южно-Чукотской котловины составляет не менее 4–5 м. В ходе рентгеноструктурного анализа подтверждено, что обнаружен именно икаит, который в комнатных условиях переходит в кальцит через ватеритовую фазу. Согласно результатам элементного анализа, пробы икаита, перешедшего в кальцит, демонстрируют схожий химический состав. Содержание СаО – 54–55%, остальных макроэлементов (в оксидах) – десятые и сотые доли процента. Содержание большинства микроэлементов – десятые и сотые доли грамма

на тонну. Исключение составляют стронций (до 940 г/т), барий (до 9.61 г/т), цинк (до 2.29 г/т), иттрий, ванадий и хром (около 1 г/т). Кроме того, установлено, что пробы икаита, перешедшего в кальцит, имеют разный изотопный состав углерода и кислорода. В пробе с северной станции значение $\delta^{13}\text{C}$ составляет -30.0% V-PDB, $\delta^{18}\text{O}$ – 1.5% V-PDB. В пробе с южной станции значение $\delta^{13}\text{C}$ существенно выше и составляет -14.8% V-PDB, $\delta^{18}\text{O}$ – 2.0% V-PDB. На основе значений $\delta^{13}\text{C}$ сделан вывод о том, что источником углерода во время кристаллизации икаита и его превращения в кальцит был растворенный неорганический углерод, разлагающееся органическое вещество, а в случае тяготения значений $\delta^{13}\text{C}$ к нижней границе интервала – еще и метан, просачивающийся из нижележащих слоев осадков. Высокие значения $\delta^{18}\text{O}$ в икаите и образованном из него кальците, – свидетельство низких температур кристаллизации.

Приоритетным направлением дальнейших работ можно считать общее расширение базы данных по икаиту в Чукотском море за счет новых научно обоснованных находок. Особый акцент в исследованиях желательнее сделать на минералого-геохимических и изотопных трансформациях в цепочке икаит-кальцит, а также на физических свойствах и вещественном составе вмещающих донных отложений с уточнением факторов, контролирующих кристаллизацию и устойчивость икаита в осадочной толще. Полученная информация будет способствовать укреплению индикаторной роли икаита.

Автор выражает признательность к.г.-м.н. Колесник О.Н. и к.г.-м.н. Колеснику А.Н. за всестороннюю помощь в освоении материала. Работа выполнена за счет средств гранта РНФ № 24-27-00098, <https://rscf.ru/project/24-27-00098/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogov M., Ershova V., Vereshchagin O. et al. Database of global glendonite and ikaite records throughout the Phanerozoic // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. P. 343–356.
2. Rogov M., Ershova V., Gaina C. et al. Glendonites throughout the Phanerozoic // *Earth-Science Reviews*. 2023. V. 241. Art. 104430.
3. Elias S.A., Short S.K., Phillips R.L. Paleoecology of Late-Glacial Peats from the Bering Land Bridge, Chukchi Sea Shelf Region, Northwestern Alaska // *Quaternary Research*. 1992. V. 38. P. 371–378.
4. Крылов А.А., Семенов П.Б., Музафарова Л.Э. и др. Икаит как маркер разгрузки углеводородов в Чукотском море // *Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. Т. IV. М.: ГЕОС, 2015. С. 41–42.
5. Колесник О.Н., Колесник А.Н., Карабцов А.А. и др. Икаит в голоценовых осадках Чукотского моря // *ДАН. Наука о Земле*. 2025. Т. 520. № 2. С. 138–144.

6. Phillips R.L., Colgan M.W. Vibracore stratigraphy of the northeastern Chukchi Sea // Geologic Studies in Alaska by the U.S. Geological Survey during 1986 / T.D. Hamilton and J.P. Galloway (Eds.). 1987. P. 157–160.

All published findings of ikaite in bottom sediments of the Chukchi Sea as at 2025 are discussed. Based on a generalization of available data, conclusions are drawn about the regional features of the distribution, composition and formation of the mineral.

**Григорьев А.Г., Жамойда В.А., Сергеев А.Ю.,
Буданов Л.М., Рябчук Д.В., Нестерова Е.Н., Невин И.А.**
(Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П.
Карпинского, Санкт-Петербург, Россия. Andrey_Grigirjev@karpinskyinstitute.ru)

Предварительные результаты литолого-геохимического изучения грунтовых колонок, отобранных в Беринговом проливе

**Grigoriev A.G., Zhamoida V.A., Sergeev A.Yu., Budanov L.M.,
Ryabchuk D.V., Nesterova E.N., Neevin I.A.**

(A.P. Karpinsky Russian Research Geological Institute, St. Petersburg, Russia)

Preliminary results of lithological and geochemical studies of sediment cores collected in the Bering Strait

Ключевые слова: четвертичные отложения, Берингово море, сейсмическое профилирование, геохимический анализ, палеосоленость.

В 2021 г. Институтом Карпинского выполнены комплексные геолого-геофизические работы в северо-западной части Берингова моря. По результатам сейсмоакустического профилирования прослежены отражающие горизонты и выделены сейсмотолщи, соответствующие четвертичным отложениям, накапливавшимся в континентальных и морских условиях. Проведены исследования кернов длиной до 3 м, отобранных из отложений, соотносимых с различными сейсмотолщами. Лабораторные исследования включали в себя геохимический и гранулометрический анализы, что позволило охарактеризовать изменения условий седиментации в Беринговом проливе в четвертичное время.

В рамках данной работы изучены грунтовые колонки, отобранные на станциях 21БЕР-5, 21БЕР-13, 21БЕР-14, 21БЕР-31. Анализировались следующие элементы Be, V, Cr, Mo, Sn, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Pb, W, As, Th, U и редкоземельные элементы (TR). Для расчета относительной палеосолености по методике, изложенной в работах [1, 4], проводилось измерение валовой концентрации брома на рентгеновском сканирующем кристалл-дифракционном спектрометре «СПЕКТРОКАН-МАКС-Г».

На сейсмических записях выделяется ряд сейсмотолщ (ССТ), разделяемых устойчиво прослеживаемыми отражающими горизонтами. Региональный горизонт СГ1, маркирующий подошву ССТ 4, выявляется по локальным несогласиям на профилях МОВ-ОГТ [3]. ССТ 4, сложен отложениями предположительно плиоцен – раннеолейстоценового возраста. Сейсмотолща ССТ 3 залегает на ней с угловым несогласием и отличается сложной волновой картиной с пластами небольшой мощности с разными углами падения. ССТ 2 выполняет локальные понижения в кровле нижележащих толщ, нивелируя их. На ряде профилей толща разделяется контрастной внутренней границей, на две подтолщи ССТ 2б и ССТ 2а,

различные по инфраструктуре записи. Сейсмотолща ССТ 1, сопоставляемая с морскими отложениями голоцена, в пределах Берингова пролива также разделяется на две подтолщи. Нижняя – ССТ 1б отображается как серия взаимно параллельных четких отражающих границ, а ССТ 1а отличается отражающими границами слабой интенсивности [2].

В кернах грунтов, отобранных на станциях, вскрывших отложения различных сейсмотолщ, изучено распределение химических элементов. Колонка 21БЕР-14, отобрана в Мечигменском заливе. Наиболее молодые отложения, соответствующие сейсмотолще ССТ 1а, соотносятся с морскими голоценовыми нефелоидными отложениями (mnIV) [2]. На интервале колонки 17–292 см грунты представлены серо-зелеными текучепластичными алевропелитами с редкими мелкими раковинами или их обломками. Поверхностный слой (0–17 см) сложен существенно более грубозернистыми осадками – песчано-глинистым алевритом с линзовидными прослоями, обогащенными обломками раковин. Рассчитанная по содержанию Вг палеосоленость по разрезу меняется незначительно, пилообразно варьируя в интервале 29–37%. В нижней части керна наблюдается слабое уменьшение палеосолености до 27%, но и это значение, в целом, соответствует нормальной морской солености.

Колонка 21БЕР-13 также вскрывает сейсмотолщу ССТ 1а, причем на полную ее мощность в данной точке. Визуально разрез на станции 21БЕР-13 похож на разрез колонки 21БЕР-14: на интервале 32–265 см осадки представлены серо-зелеными алевропелитами с редкими линзами обогащения песчаным и гравийным материалом, вероятно за счет ледового разноса, приповерхностный слой 5–32 см сложен песчано-глинисто-алевритовыми миктитами, верхние 0–5 см – отмытый мелкозернистый песок. Отличием является мощность сейсмотолщи ССТ 1а в данной точке, которая составляет всего 265 см. Ниже этой отметки в осадках резко увеличивается количество гравийно-галечного материала различной окатанности, увеличивается плотность и изменяется цвет на голубовато-серый. Предположительно нижние 20 см керна (интервал 265–285 см) уже относятся к сейсмотолще ССТ 1б, которая интерпретируется как преимущественно озерные отложения позднего неоплейстоцена – раннего голоцена (III-Н₁). Значение расчетной палеосолености, для осадков нижней части разреза на интервале 258–285 см составляет 11–12%, что соответствует солонатоводному бассейну. Выше на интервале 244–230 см происходит скачкообразное увеличение палеосолености до 23% и далее ее величина стабилизируется, что в целом, соответствует нормальной морской солености. Таким образом, можно предположить, что грунтовая колонка 21БЕР-13 в забое (265–285 см) вскрыла осадки преимущественно раннего голоцена или начала трансгрессии после сартанского похолодания, когда существенным был приток пресных вод.

Колонка 21БЕР-31 в геологическом разрезе по данным сейсморазведки

за исключением самой верхней части практически целиком приурочена к сейсмотолще ССТ 26, предположительно соотносимой с морскими отложениями первой ступени верхнего звена неоплейстоцена (mIII₁). Они представлены темно-серыми с зеленоватым оттенком плотными алевроглинами с примесью гравийно-галечного материала. Грубообломочный материал встречается по разрезу постоянно. Степень окатанности грубообломочного материала, очевидно привнесенного в осадки в результате ледового разноса, различна. Изменение гранулометрического состава по разрезу колонки свидетельствует о слабо проявленном трансгрессивном тренде. Расчетная палеосоленость по разрезу меняется, незначительно варьируя от 5% до 8%, лишь в самой верхней части разреза на интервале 15–20 см наблюдается незначительное повышение палеосолености до 11%. В целом это говорит о том, что отложения, вскрытые колонкой 21БЕР-31, образовывались в прибрежных условиях, возможно в пределах слабосоленых лагун.

Корреляция отложений, вскрытых грунтовой колонкой 21БЕР-5, с определенной сейсмотолщей не так однозначна, как для вышеописанных колонок. Станция 21БЕР-5 расположена в автономном бассейне седиментации, который отделен от других районов обширными площадями развития перлювия, подстилаемого дочетвертичными породами, поэтому проследить отражающие горизонты разреза квартера из прибрежных районов акватории практически невозможно.

Гранулометрический состав отложений в целом согласуется с распределением по разрезу величины расчетной палеосолености, которое можно разбить на несколько характерных интервалов. В нижней части, начиная с отметки 189 см (забой скважины) до отметки 120 см, расчетная палеосоленость варьирует в интервале от 5% до 8%. Причем на интервале 189–145 см наблюдается общая тенденция понижения палеосолености, а выше по разрезу на интервале 145–120 см значение палеосолености принимает пилообразный, знакопеременный характер, меняясь от 2 до 5%. На отметке 115 см палеосоленость резко падает и далее принимает пилообразный характер, варьируя в интервале содержания от 1.8% до 0.02%. Вышеизложенное может говорить о том, что в целом, отложения, вскрытые колонкой 21БЕР-5, образовывались в течение двух геологических этапов.

Вероятно, на первом более древнем этапе седиментогенез происходил в пределах слабосоленых лагун, либо прибрежных озер, частично соединенных с морем. Косвенным подтверждением морских условий осадконакопления на этом этапе является присутствие в осадках на интервале 169–115 см глауконита, вероятно аутигенного, представленного двумя генерациями – в виде округлых зерен диаметром 0.4–2.5 мм и скоплений (примазок) тонкодисперсного минерала. На втором этапе осадки верхней части разреза накапливались в практически пресноводных,

возможно и в континентальных условиях. На современном этапе развития акватории мы наблюдаем размыв этих отложений.

Сопоставление основных статистических параметров распределения химических элементов для выборок, характеризующих отложения исследуемых колонок методом математической статистики “Сравнение по средним и дисперсиям”. Сравнение проводилось по критерию Стьюдента для средних значений и по критерию Фишера для дисперсий.

Сопоставление колонок 21БЕР-13 (ССТ-1а) и 21БЕР-31 (ССТ-2б) показало значимое статистическое различие по 17 элементам из 19. То есть по геохимическим характеристикам указанные толщи значимо различаются между собой. Сопоставление колонок 21БЕР-14 (ССТ-1а) и 21БЕР-31 (ССТ-2б) показало значимое статистическое различие по 15 элементам из 18. То есть по геохимическим характеристикам указанные толщи значимо различаются между собой.

При сопоставлении выборок по колонкам 21БЕР-13 (ССТ-1а) и 21БЕР-5 значимое статистическое различие получено по 18 элементам из 19. То есть по геохимическим характеристикам указанные толщи значимо различаются между собой. При сопоставлении выборок по колонкам 21БЕР-31 (ССТ-2б) и 21БЕР-5 значимое статистическое различие получено по 15 элементам из 18. То есть по геохимическим характеристикам указанные толщи значимо различаются между собой.

Следует обратить внимание на колонку 21БЕР-5. По геохимическим характеристикам отложения, вскрытые этой колонкой, значимо отличаются от всех выделенных сейсмотолщ, соотносимых с морскими голоценовыми нефелоидными отложениями и с отложениями первой ступени верхнего звена неоплейстоцена. Вероятно, колонкой 21БЕР-5 вскрываются отложения сейсмотолщи ССТ 3, предположительно соотносимой с морскими отложениями среднего неоплейстоцена (mII). Все вышеизложенное подтверждает предположение о разнообразии условий седиментации, в которых происходило накопление отложений, вскрытых изучаемыми грунтовыми колонками.

На основании комплексного литолого-геохимического анализа четырех грунтовых колонок, сделаны предварительные заключения об условиях осадконакопления:

1. Отложения колонки 21БЕР-14 (сейсмотолща ССТ 1а) накапливались в позднем голоцене при поднятии уровня океана с переходом от солоноватоводно-морских условий к нормальным морским.
2. Колонка 21БЕР-13 (сейсмотолщи ССТ 1б – ССТ 1а) вскрыла отложения, накапливавшиеся после сартанского похолодания в раннем голоцене на начальных этапах трансгрессии в условиях значительного притока пресных вод.
3. Отложения колонки 21БЕР-31 (сейсмотолща ССТ 2б) формировались в пределах слабосоленых замерзающих лагун при намечающемся трансгрессивном тренде в суровых климатических условиях в первую

ступень верхнего неоплейстоцена. 4. Отложения, вскрытые колонкой 21БЕР-5 (сейсмотолща ССТ 3), накапливались при регрессии моря от слабосоленых лагун до пресноводных озер в холодных арктотундровых условиях, предположительно в среднем неоплейстоцене.

Комплексный анализ данных выполнен за счет гранта Российского научного фонда № 24-77-10058 «Эволюция процессов голоценового морфоседиментогенеза прибрежного шельфа Берингии в условиях климатических перестроек и усиливающейся антропогенной нагрузки».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев А.Г., Жамойда В.А., Спиридонов М.А. и др. Новые данные по истории развития юго-восточной части Балтийского моря от позднеледниковья до современности // Региональная геология и металлогения. 2009. № 40. С. 103–114.
2. Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М. и др. Эволюция процессов морфоседиментогенеза прибрежного шельфа Берингии в условиях климатических перестроек позднечетвертичного времени // Региональная геология и металлогения. 2024. Т. 31. № 4 (100). С. 95–114. https://doi.org/10.52349/0869-7892_2024_100_95-114
3. Разумный А.В., Сидоренко В.И., Сапожникова Л.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Корякско-Курильская. Лист Р-59 – Пахачи. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2017. 323 с.
4. Grigoriev A., Zhamoida V., Spiridonov M. et al. Late-glacial and Holocene palaeoenvironments in the Baltic Sea based on a sedimentary record from the Gdańsk Basin // Climate Research, special 26: Environmental change and socio-economic response in the Baltic region. 2011. V. 48. № 1. P. 13–21.

In 2021, geological and geophysical investigations were carried out by Karpinsky Institute in the northwestern part of the Bering Sea. Based on the results of seismic profiling, reflecting horizons were traced and seismic units corresponding to Quaternary sediments accumulated in continental and marine environments were identified. Studies were carried out on cores up to 3 m long, sampled sediments correlated with various seismic units. Laboratory studies included geochemical and grain-size analyses, which made it possible to characterize changes in sedimentation conditions in the Bering Strait in the Quaternary.

**Гусев Е.А.¹, Окунев А.С.¹, Бердинских Д.В.^{1,2},
Крылов А.А.¹, Элькина Д.В.¹, Хоснуллина Т.И.¹,
Семенов П.Б.¹, Захаров В.Ю.¹**

(¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов мирового океана им. академика И.С.Граumberга, Санкт-Петербург, Россия e-mail: gus-evgeny@yandex.ru; ²Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия)

Морские голоценовые осадки Шпицбергена и окружающего шельфа

**Gusev E.A.¹, Okunev A.S.¹, Berdinskikh D.V.^{1,2}, Krylov A.A.¹,
Elkina D.V.¹, Khosnullina T.I.¹, Semenov P.B.¹,
Zakharov V.Yu.¹**

(¹Gramberg All-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean, St. Petersburg, Russia; ²AARI, St. Petersburg, Russia)

Holocene marine sediments of Spitsbergen and adjacent shelf

Ключевые слова: четвертичные отложения, голоцен, арктический шельф, Шпицберген, морские террасы.

В последние несколько лет силами ВНИИОкеангеология проводились геологические исследования Шпицбергена и окружающего шельфа. Получены новые сведения о позднеплейстоцен-голоценовой палеогеографии островов Западный Шпицберген и Земля Принца Карла – изучены разрезы, содержащие растительные остатки, морские моллюски, кости морских млекопитающих и белого медведя. Исследованы желоба и подводные возвышенности в районах Стур-фиорда, о острова Надежды и на поднятии Персея.

Изучение четвертичных отложений Шпицбергена в течение 70 лет проводилось силами Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ, г. Ломоносов). В последние годы специалисты Шпицбергенской партии ПМГРЭ работают во ВНИИОкеангеология, продолжая изучение геологии архипелага [4]. В 2021–2025 гг. изучались в том числе морские террасы голоценового возраста на западном побережье Шпицбергена от Ис-фиорда на юге до Кросс-фиорда на севере. В 2022–2024 гг. силами Всероссийского научно-исследовательского института геологии и минеральных ресурсов Мирового океана (ВНИИОкеангеология) были проведены морские геолого-съёмочные работы на шельфе к востоку от Шпицбергена в районе поднятия Персея, о. Надежды и Стур-фиорда. Работы выполнялись в рамках государственного задания ВНИИОкеангеология по направлению: региональные геолого-геофизические и геолого-съёмочные работы.

Морские голоценовые отложения широко распространены на Шпицбергене, в основном формируя лестницы морских террас,

осложняющих рельеф приморских равнин и стрэндфлетов. При этом наибольшей сохранностью голоценовые террасы характеризуются в тех районах, где в течение всего голоцена не происходило разрастания ледников. На севере архипелага наибольшая высота распространения голоценовых морских осадков по данным российских и норвежских исследований не превышает отметки в 35 м, выше иногда фиксируются поздненеоплейстоценовые морские террасы.

Голоценовые морские террасы часто имеют чисто абразионное происхождение, но иногда присутствует и аккумулятивная часть, сложенная песками, галечниками, реже – с прослоями и линзами алевритов. Иногда по данным космо- и аэрофотосъемок можно проследить детали строения террас, включая штормовые валы, лагуны и протоки. На местности обычно уровни стояния голоценового моря выражены слабо, только в местах прорезания стрэндфлетов реками встречаются представительные разрезы голоценовых морских отложений. Осадки иногда содержат раковины морских моллюсков – двустворок и гастропод, кости морских млекопитающих – моржей, тюленей, китов, а также северного оленя, и даже белого медведя [3]. На берегах пролива Форландсуннет, а также в Конгс-фиорде иностранными коллегами детально изучены прибрежно-морские террасы неоплейстоценового и голоценового возраста, которые по уровню исследования можно отнести к ключевым стратотипическим разрезам [5, 6].

Нами изучались разрезы голоценовых морских террас на полуострове Бреггер, в районе Конгс- и Кросс- фиордов, на равнине Митра, на Земле Принца Карла и в других местах. Эти северные районы характеризуются бедностью органических остатков в морских голоценовых осадках, встречаются в основном лишь раковинный детрит, что создает трудности для датирования вмещающих отложений. В случае наличия песчаных отложений, отбирались пробы для определения возраста методом оптикостимулированной люминесценции. Некоторые из ключевых разрезов уже детально изучались норвежскими исследователями, другие обследовались впервые.

На шельфе Шпицбергена в 2022 и 2024 гг. работы проводились с борта НИС «Профессор Молчанов», в 2023 г. – с судна «Иван Петров» (судовладелец – ФГБУ «Северное УГМС», г. Архангельск) в районе возвышенности Персея, у о. Надежды и в Стур-фиорде в интервале глубин 50–350 м и включали в себя сейсмоакустическое профилирование с использованием профилографа и спаркера, многолучевое эхолотирование и донный пробоотбор с помощью дночерпателя ван-вин и грунтовой трубки [1, 2]. По полученным сейсмоакустическим данным можно судить о морфологических особенностях морского дна и мощности самого верхнего осадочного слоя, а также иногда – о строении слабоскладчатых горных пород мезозойского возраста. Донное опробование на шельфе Шпицбергена за три года выполнено на 194 станциях. Плейстоцен–голоценовые осадки,

вскрытые дночерпателем, представлены в основном алеврито-пелитовыми осадками, иногда с примесью песка. На нескольких станциях донные осадки отсутствовали, зато в дночерпатель попадал донно-каменный материал, а иногда и железо-марганцевые корки и конкреции. То есть, местами на поверхности морского дна обнажаются коренные породы и их элювий.

Голоценовые осадки на шельфе Шпицбергена имеют незначительную мощность, составляя в среднем 5–10 м, и лишь местами увеличиваясь до 25–30 м в местах развития флювиогляциальных и склоновых образований у подножия склонов. На вершинах банок и подводных возвышенностей голоценовые отложения либо отсутствуют вовсе, либо покрывают коренные породы тонким плащом мощностью менее метра.

На мелководных участках в морском дне часто встречаются локальные холмы и плосковершинные возвышенности, которые являются, по-видимому, эрозионными останцами, вершины которых сложены базальтами или долеритами, предохраняющими их от разрушения.

По морским и сухопутным данным можно отметить, что в среднем голоцене скорости осадконакопления значительно снижались, либо среднеголоценовые осадки отсутствуют в разрезе. Это говорит о возможной кратковременной регрессии морского бассейна. На островах архипелага голоценовые морские террасы подвергались заметному воздействию выветривания, размыва речными и флювиогляциальными потоками, склоновых процессов и др. На шельфе голоценовое осадконакопление происходило неравномерно в разных районах, и было изменчивым по интенсивности во времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров А.Ю., Гусев Е.А., Крылов А.А. и др. Строение дна Баренцева моря в районе западных отрогов возвышенности Персея // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Вып. 9. С. 128–132.
2. Гусев Е.А., Крылов А.А., Сазонов А.Ю. и др. Четвертичные отложения района желоба Стур-фиорд (Баренцево море) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 69–80.
3. Окунев А.С., Фомичева Е.Д., Соловьева Д.А., Веркулич С.Р. Палеогеографические и геоморфологические исследования северо-западного побережья Земли Оскара II и северной части Земли Принца Карла (Шпицберген) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 269–274.
4. Сироткин А.Н., Шарин В.В., Милославский М.Ю. и др. Геологические исследования на Шпицбергене: люди, события, результаты. Спб.: ВНИИОкеангеология, 2022. 232 с.
5. Alexanderson H., Landvik J.Y., Ryen H.T. Chronology and styles of glaciation

in an interfjord setting, northwestern Svalbard // *Boreas*. 2011. V. 40. P. 175–197. doi:10.1111/j.1502-3885.2010.00175.x.

6. Alexanderson H., Henriksen M., Ryen H.T. et al. 200 ka of glacial events in NW Svalbard: an emergence cycle facies model and regional correlations // *Arktos*. 2018. V. 4. P. 1–25. doi:10.1007/s41063-018-0037-z

In recent years, VNIIOkeangeologia has conducted geological studies of Spitsbergen and the surrounding shelf. New information has been obtained on the late Neopleistocene-Holocene paleogeography of the islands of West Spitsbergen and Prince Karles Foreland – key sections containing plant remains, marine mollusks, bones of marine mammals and polar bears have been studied. Trenches and underwater elevations in the areas of Stoorfjord, near Nadezhda Island and on the Perseus Rise have been studied.

Дара О.М., Козина Н.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва,
e-mail: olgadara@ocean.ru)

Первый опыт эксплуатации нового портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай) в условиях морской экспедиции

Dara O.M., Kozina N.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

First experience using the new portable X-ray diffractometer SHANE LAN Scientific (China) in a marine expedition.

Ключевые слова: рентгеновская дифрактометрия, портативный дифрактометр, донные осадки, Баренцево море, Карское море

В 96-м рейсе на НИС «Академик Мстислав Келдыш» был получен первый опыт эксплуатации нового портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай) в условиях морской экспедиции. Методом рентгенографического фазового анализа порошка было изучено около 70 образцов консолидированных донных осадков, мономинеральных фракций, обломков горных пород, раковины моллюсков, а также образец икаита.

В 96-м рейсе на НИС «Академик Мстислав Келдыш» был получен первый опыт эксплуатации нового портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай) в условиях морской экспедиции.

В рамках экспедиции было запланировано изучение минерального состава поверхностного слоя донных осадков Баренцева и Карского морей методом рентгенографического фазового анализа с использованием портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай). Важной задачей являлась оценка возможности использования прибора в качестве инструмента экспресс-анализа геологических материалов, получаемых в ходе экспедиции. Прибор представляет собой короб, не подлежащий вскрытию, с разъемами для кабелей и отверстием для установки рамки с пробой. Внутренний ультразвуковой шейкер обеспечивает перемешивание пробы в процессе съемки, имитируя вращение частиц. Рентгеновская трубка имеет Cu-анод (1.54056 Å), с рекомендованными напряжением 30 kV и током 0.4 mA. Диапазон съемки 5–55 2 θ °.

Предложенная разработчиком прибора методика предполагает измельченный в алюминиевой ступке до фракции меньше 150 мкм образец просеять и поместить (15 мг) в держатель образца (слейсер) с помощью внешнего ультразвукового шейкера. Для экспресс-анализа образца разработчик предлагает съемку в течение 5–15 минут (рекомендовано 5 сек

x120=600 с, 10 мин), что предполагает различные сочетания времени экспонирования образца (сразу во всем угловом диапазоне) в секундах и количества итераций. Освобождение спейсера от пробы предлагается осуществлять с помощью внешнего ультразвукового устройства. Управление прибором и обработка спектров осуществляется с помощью персонального компьютера с предустановленной программой CrystalX, разработанной LANScientific для этих целей. Также прибор укомплектован алюминиевой ступкой, ситом, набором отверток и упаковкой со сменными спейсерами.

Результаты предложенного производителем методического подхода, при применении его к изучению геологических образцов (донных осадков, обломков пород), оказались неудовлетворительными и привели к необходимости поиска оптимальных режимов съемки и способов пробоподготовки.

Интенсивное тестирование прибора для различных типов образцов, с изменением параметров съемки, позволило найти ряд методических приемов, дающих возможность получить удовлетворительные результаты при анализе некоторых типов образцов.

Первое, что необходимо отметить, что методика анализа консолидированных донных осадков на дифрактометре SHANE отличается от методики, применяемой для анализа мономинеральных фракций, обломков пород, биогенных и аутигенных образований.

Размер частиц, предлагаемый разработчиком (0.15 мм), не дает возможности получить рентгенограмму хорошего качества с полным набором пиков. Кроме того, алюминиевая ступка цилиндрической формы не позволяет растереть образец до однородности и нужного размера частиц. Этот этап пробоподготовки был заменен на растирание в агатовой ступке с использованием спирта до получения фракции 0.01–0.001 мм, которая принята в рентгенографии как оптимальная.

Наполнение и освобождение спейсера разработчик предлагает производить с помощью внешнего шейкера. Такой способ его разгрузки не всегда является эффективным, часть материала остается, окна спейсера мутнеют. Нами предложена очистка спейсера пневматическим очистителем высокого давления, представляющим собой баллон со сжатым воздухом. Этот метод обеспечивает хорошие результаты, полное удаление материала, однако, многократная очистка спейсера таким способом деформирует его, изменяя форму и объем, что приводит к искажению дифракционной картины. Полученный опыт показал, что многократное использование спейсера, рекомендованное производителем, вносит дополнительные ошибки, и, несмотря на его дороговизну, спейсер необходимо заменять на новый после каждых 3–4 приготовлений образцов.

Рекомендованный режим съемки 5–15 минут не подходит для анализа многофазных (до 15 минералов и более) образцов, каковыми являются

консолидированные донные осадки. Рекомендованное время экспонирования не позволяет получить интенсивные рефлексы, а конструктивная особенность дифрактометра SHANE (съемка в угловом диапазоне 5–55 $2\theta^\circ$) исключает возможность диагностировать минералы, чьи рефлексы расположены в малоугловой области и в области выше 55 $2\theta^\circ$ – осложнена диагностика некоторых сульфидных минералов, некоторых минералов группы цеолитов, гидроксидов марганца. Диагностика глинистых минералов осложнена недоступностью для съемки малоугловой области, не предусмотрена возможность анализа ориентированных препаратов. Кроме того, чрезвычайно трудно добиться разрешения пиков находящихся на расстоянии 0.3° друг от друга, что гарантировалось производителем прибора. Для улучшения качества дифрактограмм были проведены многократные съемки образцов с постепенным увеличением экспозиции и количества итераций. Время съемки, таким образом, было доведено до 40 минут (иногда более). Воспроизводимость профиля одной и той же пробы неудовлетворительная. Поэтому был выбран подход, предусматривающий последовательное получение нескольких дифрактограмм одного и того же образца, сравнение их, выбор наиболее «сходимых» с последующим их суммированием. При пересъемке образца следует проверять состояние пробы в шейкере, при необходимости подсыпать и встряхивать внешним шейкером образец.

Методика проведения анализа мономинеральных фракций, обломков пород, биогенных и аутигенных образований также была оптимизирована. Необходимым этапом подготовки таких образцов для получения качественных дифрактограмм является измельчение материала в агатовой ступке с использованием спирта до достижения размера частиц 0.01–0.001 мм. Необходим подбор времени экспонирования с проведением контрольной пересъемки. Опыт показал, что положительный результат может быть получен при 10–15-минутном экспонировании.

Таким образом, для получения дифрактограмм удовлетворительного качества была проведена оптимизация пробоподготовки и режимов съемки для двух типов образцов – (1) консолидированных донных осадков, а также (2) мономинеральных фракций, обломков пород, биогенных и аутигенных образований. Формирование методических подходов потребовало проведения около 200 съемок образцов и сопровождалось подбором режимов пробоподготовки и съемки на рентгеновском дифрактометре SHANE.

В результате, методом рентгенографического фазового анализа порошка с использованием портативного рентгеновского дифрактометра SHANE LANScientific (Китай) в условиях морской экспедиции были получены данные по минеральному составу 73 образцов консолидированных донных осадков, мономинеральных фракций, обломков пород, раковин моллюсков, а также образец икаита. Усовершенствование методики позволило

улучшить качество дифрактограмм и расширить спектр определяемых минералов в многофазной пробе от одного–двух до 4–5. Это позволило получить в процессе экспедиции некую фактуру для дальнейших исследований – диагностированные минералы группы карбонатов (доломит, кальцит, сидерит) имеют региональную приуроченность; минеральный состав обломков горных пород указывает на области сноса, питающие провинции; а различные виды раковин моллюсков, кораллы, мшанки характеризуются разным минеральным составом; аутигенный гексагидрат карбоната кальция - икаит ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), по своему составу отражает этап деградации – икаит, ватерит, кальцит.

Полученный в ходе экспедиции опыт позволяет сделать первые выводы.

1. Оптимизация методики проведения анализа консолидированных донных осадков повысила качество дифрактограмм, но затраченное на анализ одного образца время не позволяет назвать его экспресс-методом. Кроме того, доступная полнота исследования материала не удовлетворяет всем требованиям морской геологии. Это связано с конструктивными особенностями дифрактометра SHANE. Недостаточный угловой диапазон 5–55 $2\theta^\circ$ осложняет, а в некоторых случаях, исключает возможность диагностировать минералы, чьи рефлексы расположены в малоугловой области (глинистые минералы, некоторые цеолиты, гидроксиды марганца). Невозможен анализ минералов, диагностические пики которых расположены в области выше 55 $2\theta^\circ$ (например, пирита). Прибор непригоден для полного фазового анализа консолидированных донных осадков, но позволяет диагностировать в многофазной пробе до 5 минералов.
2. Результаты анализа мономинеральных фракций, обломков, горных пород, биогенных и аутигенных образований можно считать удовлетворительным. Диагностика в предусмотренном производителем угловом диапазоне доступна для карбонатов, сульфатов, фосфатов, кварца, полевых шпатов (без детализации), сульфидов (с ограничениями) и пироксенов, амфиболов (с ограничениями) и ряда других минералов, чьи диагностические пики расположены в интервале 5–55 $2\theta^\circ$.
3. Из сказанного выше следует, что использовать дифрактометр SHANE для проведения полного количественного анализа консолидированных донных осадков не рекомендуется. Возможна диагностика минералов (с указанными выше ограничениями) в монофракциях и 3–4-фазных образцах, а также полуколичественное описание дифрактограмм, позволяющее проводить типизацию осадков.
4. Эффективность анализа повышает предварительное фракционирование материала по физическим свойствам (например,

магнитным, по плотности), а также по гранулометрическим параметрам.

5. В вопросе пробоподготовки найдены некоторые методические приемы, повышающие качество съемки. Подобраны оптимальные режимы.
6. Прибор портативный (настольный), простой в эксплуатации, экспрессный для образцов, состоящих не более чем из 2–3 минералов.

Авторы благодарны руководителю экспедиции Кравчишиной М.Д., Клювиткину А.А., Новигатскому А.Н., Новичковой Е.А., Матулю А.Г., Баранову Б.В. и геологическому отряду за организацию работ и помощь при отборе осадков, а также капитану Горбачу Ю.Н. и экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Экспедиционные исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020.

During the 96th cruise on the research vessel "Akademik Mstislav Keldysh", the first experience was gained in operating the new portable X-ray diffractometer SHANE LANScientific (China) under marine expedition conditions. Using the powder X-ray phase analysis method, approximately 70 samples were studied, including consolidated bottom sediments, monomineralic fractions, rock fragments, pebbles, crushed rock, mollusk shells, as well as a sample of ikaite.

**Дара О.М., Козина Н.В., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С.,
Новичкова Е.А., Терновой Д.А.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

olgadara@ocean.ru)

Новые данные об икаитах в морях Арктики

**Dara O.M., Kozina N.V., Kravchishina M.D., Filippov A.S.,
Novichkova E.A., Ternovoy D.A.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

New data on ikaites in the Arctic seas

Ключевые слова: Донные осадки, Карское море, Печорское море, икаит, ватерит, рентгеновская дифрактометрия, размер кристаллитов

Исследованы образцы икаита, обнаруженные в донных осадках Печорского и Карского морей на разных субаквальных горизонтах, отобранных в рамках экспедиционной программы ИО РАН «Европейская Арктика: геологическая летопись изменений окружающей среды и климата». Получены новые данные о фазовых переходах в процессе разложения икаита после извлечения образцов на поверхность.

Нефтегазоносность Карского моря оценивается многими исследователями как весьма высокая. Экспедиционные исследования, направленные на поиск отложений газгидратов, а также сфокусированной разгрузки углеводородов (УВ), приводят к находкам скоплений аутигенных карбонатов кальция [1–7]. Одним из таких минералов является метастабильный минерал икаит – моноклинный гексагидрат карбоната кальция ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Он образуется в осадочной толще в восстановительных условиях и стабилен при низких температурах ниже 7°C . Для его формирования в донных осадках необходимо наличие химически доступного кальция и гидрокарбонат-ион, а также присутствие ингибиторов, препятствующих росту безводных карбонатов кальция (кальцит, Mg-кальцит, доломит, арагонит и др.) – это растворенные органический углерод, аминокислоты, сульфаты, фосфаты [3–4, 6]. При изменении условий минерал разлагается с образованием полиморфных модификаций карбоната кальция и выделением воды. С помощью рентгенографического фазового анализа обычно в образцах диагностируют три полиморфные модификации – моноклинный икаит, гексагональный ватерит CaCO_3 и ромбоэдрический кальцит CaCO_3 в разных соотношениях. Многими исследователями описаны образцы, встреченные в виде исходной модификации, многофазного образования с присутствием икаита, а также и в виде псевдоморфоз, называемых глендонитами, кальцитового состава. В природных условиях этот минерал был обнаружен во фьорде Икка у юго-западной окраины Гренландии [1], описаны находки икаита в Печорском,

Карском, Охотском морях, море Лаптевых, во льдах Антарктиды и др. При условии доказанности, что гидрокарбонат-ион был образован при окислении метана, икаит может служить поисковым признаком нефтегазоносных структур [5]. Узкий диапазон стабильности икаита открывает возможность использования его при палеоклиматических реконструкциях [7].

В настоящей работе рассмотрены образцы, обнаруженные в донных отложениях Печорского и Карского морей (рис. 1). Один образец икаита был найден в колонке осадков, отобранных трубкой большого диаметра (ТБД), из контуритового дрифта в Печорском море (93-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», ст. 7727, слой 435–438 см, глубина моря 181 м). Икаит представлен крупным кристаллическим агрегатом, размером $6.5 \times 3 \times 2.5$ см, с хорошо выраженными гранями и спайностью по разным плоскостям. Вмещающие икаит осадки представлены восстановленными алевритовыми пелитами разных оттенков от насыщенно темно-серого цвета (5Y/3/1) до почти черного цветов (5Y/2.5/1) с многочисленными включениями гидротроилита. Возраст вскрытых осадков голоценовый.

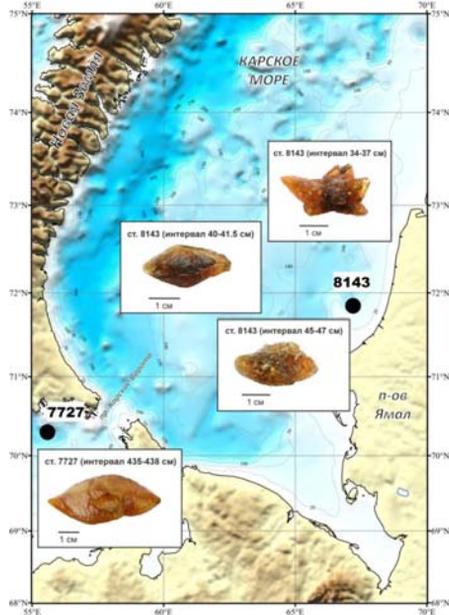


Рис. 1. Карта-схема станций обнаружения икаита в осадках Печорского и Карского морей. На врезках даны фотографии образцов икаита.

Другие три образца икаита извлечены из колонки донных осадков из холодного метанового сипа на Приямальском шельфе Карского моря в слоях 34–37 см, 40–41,5 см и 45–47 см (96-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», ст. 8143, глубина моря 50 м). Икаит из интервала 34–37 см представлен хрупкими сростками кристаллических агрегатов, размером

3.2×1.8×1.5 см. В каждом из сростков наблюдается спайность. В слое 40–41.5 см икаит представлен кристаллическим агрегатом размером 2.8×1.4×1 см без ярко выраженных граней. В кристаллическом агрегате явно прослеживается его центральная часть и наблюдается рост в виде каемки. В интервале 45–47 см икаит представлен хрупким кристаллическим агрегатом размером 3×1.5×1 см. Осадки, вмещающие икаиты – восстановленные алевритистыми пелитами темного зеленовато-серого цвета (Gley 1/3/5GY) с запахом сероводорода; возраст голоценовый. С глубины 21 см вплоть до основания колонки наблюдалась дегазация осадка, что проявлялось в виде образования множества бугорков на зачищенной поверхности колонки. Все икаиты имеют янтарный медово-желтый цвет. Образцы из Карского моря отличаются более темными оттенками вплоть до коричневого к центру агрегатов икаита и тонкодисперсными включениями черного цвета.

Образцы изучены методом порошковой рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр D8 ADVANCE, Bruker AXS, Германия), а также с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) VEGA-3 TESCAN (TESCAN, Чехия) с рентгеноспектральным микроанализатором INCA Energy (OXFORD Instruments, Великобритания) и стереоскопического микроскопа Stemi 508 (Carl Zeiss Microscopy GmbH, Германия).

Методика пробоподготовки, включающая в себя проведение всех аналитических манипуляций в холодной комнате, позволила получить качественные дифрактограммы. В результате было установлено, что исходные образцы, извлеченные из двух контрастных по условиям залегания точек, отличаются по фазовому составу (рис. 2).

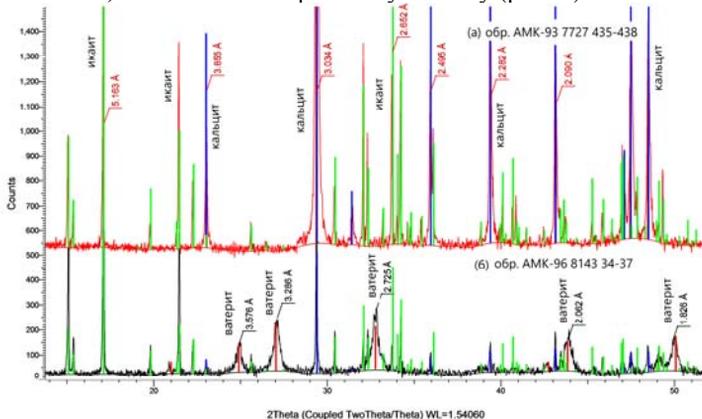


Рис. 2. Дифрактограммы исходных «свежих» образцов икаита из Печорского (а) и Карского (б) морей.

Исходный «свежий» образец из донных отложений Печорского моря представляет собой хорошо раскристаллизованный икаит, с полным

набором дифракционных пиков, и кальцит, как продукт его трансформации. Исходный образец из донных осадков Карского моря – это также хорошо раскристаллизованный икаит, вместе с тем, в качестве продуктов его трансформации идентифицированы ватерит и кальцит. Небольшие колебания в значениях межплоскостных расстояний могут свидетельствовать о зональности образцов, отражающей доступность катионов для изоморфного замещения в питающем растворе. Это также подтверждается наличием Mg по данным микронзондового анализа: от 0.34% до 3% вес.

Далее образцы были сняты через час, сутки, через месяц, через 3 месяца. В образце из Печорского моря через час еще регистрировались слабоинтенсивные пики икаита, основной же фазой был кальцит, который диагностировался при последующих пересъемках как единственная минеральная фаза.

В образце из Карского моря через час были зарегистрированы ватерит и кальцит. Последующие съемки показали присутствие этих двух минералов в различных соотношениях.

Анализ дифрактометрических профилей изученных образцов указывает на одновременное присутствие в пробе минералов с кристаллической решеткой разной степени упорядоченности – это группа тонких остроконечных симметричных высоких рефлексов икаита и кальцита и диффузные рефлексы, пологие, с низкой интенсивностью относящиеся к ватериту. Численные значения этих дифрактометрических характеристик позволили определить размер кристаллитов, области когерентного рассеяния (ОКР) и в сочетании с данными СЭМ – визуализировать процесс трансформации икаита, дифференцировать минералы, имеющие схожий химический состав, но различающиеся по структуре кристаллической решетке и проводить в дальнейшем сравнительный анализ процессов, отражающих динамические условия формирования минералов.

Таким образом, образцы икаита в донных осадках Приямальского шельфа Карского моря и Печорского моря отличаются друг от друга по механическим свойствам, размерам, габитусу и оттенкам янтарного цвета. Получены новые данные о фазовых переходах в процессе разложения икаита при повышении температуры. Псевдоморфная трансформация икаита проходила с образованием ватерита и кальцита в изученных образцах из осадков Карского моря и с образованием кальцита в образцах из осадков Печорского моря. Относительное содержание ватерита в образцах икаита из Карского моря со временем росло и при достижении некоторого постоянного значения, оставалось на стабильном уровне наряду с кальцитом спустя и полгода от начала эксперимента. Исследование трансформации минералов карбоната кальция актуально не только для палеорекоonstrukций климата, но и востребовано при разработке материалов биомедицинского назначения.

Данные о размере кристаллитов (ОКР) являются важным инструментом для понимания условий формирования и механизма трансформации икаита. Значения ОКР для икаита, ватерита и кальцита в сочетании с данными СЭМ будут использованы как основа для дальнейших исследований путей трансформации метастабильного минерала.

Авторы благодарят Кловиткина А.А. и Новигатского А.Н. за организацию работ и помощь при отборе осадков, Матуля А.Г., Баранова Б.В. и геологический отряд за помощь при отборе осадков, а также капитана Горбача Ю.Н. и экипаж НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Экспедиционные исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020. Исследования осадков частично поддержаны грантом Российского научного фонда (№ 25-17-00334, <https://rscf.ru/project/25-17-00334/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pauly H. «Ikaite», a new mineral from Greenland // *Arctic*. 1963. V. 16. P. 263–264.
2. Marland G. Stability of calcium carbonate hexahydrate (ikaite) // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1975. V. 39. P. 83–91.
3. Bischoff J.L., Fitzpatrick J.A., Rosenbauer R.J. The solubility and stabilization of ikaite ($\text{CaCO}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$) from 0° to 25°C: Environmental and paleoclimatic implications for thinolite tufa // *The Journal of Geology*. 1993. V. 101. P. 21–33.
4. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Саввичев А.С. и др. Аутигенный Мг-кальцит на метановом полигоне в море Лаптевых // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 194–213.
5. Гусев Е.А., Матюшев А.П., Рудой А.С. и др. Четвертичные отложения центральной части Карского моря // *Опыт системных океанологических исследований в Арктике* / Ред. А.П. Лисицын. М.: Научный мир, 2001. С. 553–558.
6. Логвина Е.А., Крылов А.А., Гусев Е.А. и др. Икаит в отложениях Карского моря: Находки в рейсе НИС «Фридьоф Нансен» // *Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России*. 2023. Вып. 10. С. 181–191. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-181-191
7. Rogov M., Ershova V., Vereshchagin O. et al. Database of global glendonite and ikaite records throughout the Phanerozoic // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 343–356. doi: 10.5194/essd-13-343-2021

Ikaite samples found in bottom sediments of the Pechora and Kara seas at different subaqueous layers were studied. New data was obtained on phase transitions during ikaite transformation after their recovery.

**Даувальтер В.А., Адамская П.Н., Банникова Ю.М.,
Слуковский З.И., Елизарова И.Р.**

(Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты,
e-mail: v.dauvalter@ksc.ru)

**Геохимия поверхностных вод острова Кильдин,
Мурманская область**

**Dauvalter V.A., Adamskaya P.N., Bannikova Yu.M.,
Slukovski Z.I., Elizarova I.R.**

(Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity,
v.dauvalter@ksc.ru)

**Geochemistry of surface waters of Island Kildin, Murmansk
Region**

Ключевые слова: Арктика, остров Кильдин, озеро Могильное, поверхностные воды, микроэлементный состав

Приводятся результаты впервые проведенных исследований микроэлементного состава водных объектов поверхностных вод острова Кильдин, Баренцево море. На формирование микроэлементного состава поверхностных вод острова влияют морские аэрозоли и геохимические особенности горных пород на водосборах.

Остров Кильдин расположен в 1.5 км от Мурманского берега Кольского п-ова к востоку от выхода Кольского залива Баренцева моря (рис.). Длина острова 17.6 км, ширина до 7 км. Остров представляет собой холмистое плато высотой до 280 м.

Целью впервые проведенных гидрохимических исследований является определение содержания микроэлементов в водных объектах острова Кильдин и установление основных факторов формирования микроэлементного состава этого фонового района, находящегося в Арктической зоне Российской Федерации.

Проведены исследования микроэлементного состава 12 водных объектов поверхностных вод – в 8 озерах, включая реликтовое озеро Могильное, и 4 ручьях (рисунок). Пробы воды отбирались с берега водных объектов с их поверхности вследствие отсутствия лодки в пластиковые бутылочки объемом 100 мл и хранились при температуре 4°C до проведения анализа. Микроэлементный состав определялся методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре ELAN-9000 (PerkinElmer, США). Проводилось определение более 40 микроэлементов, включая тяжелые металлы и редкоземельные элементы (РЗЭ). Содержание микроэлементов в поверхностных водах острова Кильдин и сопоставление их с содержанием в озерах северо-запада Мурманской области [1] и в озере Большой Вудьявр [2] приведены в таблице.

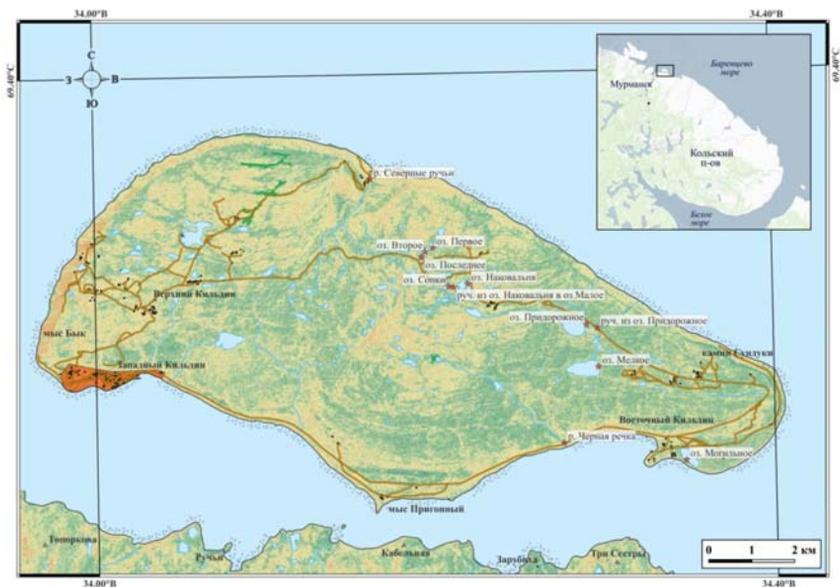


Рисунок. Карта-схема отбора проб поверхностных вод о-ва Кильдин.

Образования острова Кильдин относятся к Тимано-Варангерской системе байкалид и представляют собой моноклинальное напластование метаморфизованных осадочных комплексов, датируемых средним, поздним рифеем и вендом. Возраст пород был определен калий-аргоновым методом по глаукониту из песчаника, и составляет 1059–762 млн. лет [3]. Кильдинский литотип представлен песчаниками (30%), аргиллитами (19%) и алевролитами (24%). В его составе также определяется сульфидная минерализация, включая пирит, халькопирит и лимонит (1.5–7.8%). В разрезе встречаются полимиктовые конглобрекции с фосфоритовыми обломками и карбонатными стяжениями, указывающими на начальный метаморфизм [4]. На большей части о-ва Кильдин коренные породы не перекрыты слоями четвертичных отложений и выходят на дневную поверхность.

На острове Кильдин находится реликтовое озеро Могильное, примечательное наличием хорошо проницаемой перемычки и проникновением морских вод, вследствие чего в озере отмечается плотностная стратификация с высокими значениями градиента плотности. Разрез воды в озере имеет несколько слоев воды разной солености, от почти пресной на поверхности (соленость не более 3‰) до солености более 30‰ в придонном слое, характеризующимся наличием анаэробной сероводородной толщи.

Таблица. Медиана и вариабельность (min-max) содержания микроэлементов (мкг/л) в поверхностных водах острова Кильдин, медиана и вариабельность (min-max) содержания в озерах северо-запада Мурманской области [1] и содержания в озере Большой Вудъявр [2]

Элементы	Остров Кильдин	С-З Мурманской обл.	Большой Вудъявр
Ni	0.64 (0.14–2.44)	0.9 (<0.2–5.5)	3.65
Cu	0.68 (0.15–1.30)	0.7 (0.2–2.9)	11.8
Cr	0.82 (0.50–3.43)	0.20 (<0.1–0.5)	0.36
Sr	6.01 (3.88–1120)	11 (4–23)	123
Zn	1.91 (0.30–5.59)	0.9 (0.2–4.7)	4.60
Pb	0.071 (0.003–0.183)	0.1 (<0.1–0.6)	0.028
Mn	0.89 (0.06–4.76)	1.6 (0.2–18)	0.44
Cd	0.008 (0.002–0.014)	0.09 (<0.05–0.21)	0.020
Co	0.070 (0.006–0.128)	0.20 (<0.2–0.3)	0.036
Li	0.64 (0.27–31.7)	0.18 (0.11–0.65)	0.64
La	0.025 (0.001–0.106)	0.24 (0.07–0.62)	0.008
Ce	0.068 (0.0003–0.188)	0.29 (0.12–1.13)	0.009
Pr	0.0113 (0.0004–0.0265)	0.04 (0.01–0.07)	0.002
Nd	0.061 (0.002–0.139)	0.10 (0.04–0.21)	0.005
Y	0.059 (0.004–0.121)	0.07 (0.02–0.10)	0.004
Σ REE	0.316 (0.017–0.722)	0.92 (0.37–2.81)	0.031
Sc	0.20 (<0.003–0.24)	0.4 (<0.1–0.8)	1.86
Ba	2.42 (0.78–8.12)	–	3.49
Sb	0.019 (0.015–0.094)	0.04 (0.01–0.13)	0.483
Sn	0.0048 (0.0012–0.0102)	0.09 (0.04–0.32)	0.154
V	0.37 (0.14–9.59)	0.35 (<0.02–0.76)	1.72
Ti	0.26 (0.045–0.59)	1.79 (0.48–8.27)	0.88
Cs	0.0034 (0.0025–0.0661)	–	0.063
Bi	0.0008 (<0.0007–0.0123)	0.01 (<0.01–0.03)	0.046
Rb	0.53 (0.34–14.2)	0.63 (0.34–1.73)	8.13
U	0.006 (0.001–0.376)	0.03 (0.01–0.30)	0.237
Nb	0.0028 (0.0003–0.0355)	–	0.005
W	0.023 (0.004–0.101)	0.02 (<0.02–0.05)	0.68
Mo	0.031 (0.012–2.74)	0.14 (0.04–0.32)	9.23
Tl	0.0015 (<0.0001–0.0034)	–	0.055
Zr	0.074 (0.006–0.163)	0.05 (<0.02–0.15)	0.007
Hf	0.0025 (0.0004–0.0044)	–	–

Исследования микроэлементного состава поверхностных вод о-ва Кильдин сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН в 2024 г. были проведены впервые. До настоящего времени химический состав воды был исследован только в оз. Могильное, и подробное его описание дано по результатам исследований сотрудников ММБИ КНЦ РАН, проведенные в 70-х гг. прошлого века [5]. Вследствие проникновения морских вод в оз. Могильное через хорошо проницаемую перемычку, вода во всех слоях хлоридно-натриевого состава, на втором месте среди главных ионов сульфат-ион и магний. Вследствие наибольших размеров озера Могильное влияние морских аэрозолей должно сказываться на формировании химического состава всех

водных объектов озера, поэтому можно предполагать, что поверхностные воды здесь должны быть хлоридно-натриевого состава, как это было отмечено в озерах прибрежной зоны северо-запада Мурманской области [1]. Но наличие карбонатных отложений и сульфидной минерализации в составе горных пород о-ва Кильдин может вносить свои коррективы в формирование главного ионного состава поверхностных вод острова. Например, известно, что вода подземного источника, впадающего в оз. Могильное и оказывающего опресняющее воздействие на поверхностный слой оз. Могильное, сульфатно-натриевого состава при минерализации 0.52 г/л [5], что не характерно для природных вод Мурманской области.

На микроэлементный состав оз. Могильное оказывает влияния просачивание морской воды, поэтому даже в опресненном поверхностном слое воды озера сохранились особенности химического состава морской воды. Поэтому среди всех исследованных водных объектов о-ва Кильдин наибольшие содержания щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba), а также тяжелых металлов (Ni, Cu, Co, Sb, V, Ti, Bi, U, Nb, W, Mo) зафиксировано в оз. Могильное, и они выше, чем в озерах северо-западной части Мурманской области [1], что, вероятно, связано с особенностями морской воды, химический состав которой характеризуется повышенным микроэлементным содержанием щелочных, щелочноземельных и тяжелых металлов. Содержание щелочных и щелочноземельных металлов в воде озера Могильное на 1-2 порядка выше, чем во всех других водных объектах, и также выше их концентраций в озере Большой Вудъявр Хибинского горного массива, в которое поступают стоки апатит-нефелинового производства из АО «Апатит» (табл.) [2]. Апатит-нефелиновые руды характеризуются повышенным содержанием всех щелочных и щелочноземельных металлов, а также редкоземельных элементов (РЗЭ) [6, 7], поэтому сточные воды АО «Апатит» также содержат повышенные концентрации вышеперечисленных элементов.

Наибольшие содержания всех РЗЭ, а также Cd, Zr и Hf, обнаружены в воде озера Последнее, что, вероятно, связано с особенностями геохимического состава слагающих водосбор этого озера горных пород. Эти максимальные содержания также выше концентраций РЗЭ и других вышеперечисленных элементов в озере Большой Вудъявр. Высокое содержание РЗЭ, а также сопутствующих им Zr и Hf, связано, скорее всего, с наличием выходящих на поверхность острова фосфоритов [4]. В воде озера Последнее фиксируются также высокие содержания тяжелых металлов, что связано с упомянутыми выше геохимической ассоциацией P, Mo, Pb и Cu и рудопроявлениями Zr и Cu.

Для выявления связей между содержаниями микроэлементов в поверхностных водах о-ва Кильдин был использован корреляционный анализ и факторный анализ методом главных компонент, традиционно применяемые для интерпретации результатов гидрохимических

исследований [2]. По результатам корреляционного и факторного анализа выявлено две группы микроэлементов и два значимых фактора, объясняющих 65% общей дисперсии. Первая группа микроэлементов объединяет РЗЭ, Zr и Hf и основную часть тяжелых металлов (Mn, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Ni и др.). Это первый фактор в факторной модели, и он объясняется влиянием особенностей геохимического состава коренных горных пород, т.е. отмеченные ранее сульфидная минерализация, геохимическая специализация фосфоритов, включающая P, РЗЭ, Zr, Pb, Cu и другие тяжелые металлы в составе сульфидов. Влияние морских аэрозолей и морских вод, поступающих в оз. Могильное и других водных объектов острова, сказалось в формировании второй группы микроэлементов – это объединение щелочных и щелочноземельных металлов (Li, Rb, Sr, Cs и Ba) и сопутствующие им V, Mo, Nb, W.

Авторы благодарят сотрудников ИППЭС КНЦ РАН за выполнение химических анализов.

Работа выполнена в рамках темы гранта РФФИ 24-17-20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеенко Т.И., Дину М.И., Гашкина Н.А., Кремлева Т.А., Хорошавин В.Ю. Геохимические закономерности распространения элементов в водах озер арктических регионов // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 6. С. 521–532.
2. Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Слукровский З.И. Влияние стоков апатит-нефелинового производства на биогеохимические процессы в арктическом горном озере // *Геохимия*. 2022. Т. 67. № 10. С. 1013–1028.
3. Беккер Ю.Р., Негруца В.З., Полевая Н.И. Возраст глауконитовых горизонтов и верхней границы гиперборей восточной части Балтийского щита // *ДАН СССР*. 1970. Т. 193. № 5. С. 1123–1126.
4. Чикирев И.В. Верхнедокембрийские фосфоритсодержащие отложения Кольского полуострова: автореф. дис. ... канд. г.-м.н. М.: МГУ, 1995. 18 с.
5. Реликтовое озеро Могильное. Л.: Наука, 1975. 298 с.
6. Яковенчук В.Н., Иванюк Г.Ю., Пахомовский Я.А., Меньшиков Ю.П. Минералы Хибинского массива. М.: Земля, 1999. 326 с.
7. Dauvalter V., Slukovskii Z., Denisov D., Guzeva A. A Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution // *Water*. 2022. V. 14. № 24. 4044.

The results of the first studies of the trace element composition of water bodies of surface waters of Island Kildin, Barents Sea, are presented. The formation of the trace element composition of the island's surface waters is influenced by marine aerosols and geochemical features of rocks in the catchment areas.

Демина Л.Л., Алексеева Т.Н., Булохов А.В.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: ldemina@ocean.ru)

О связи элементного и гранулометрического состава в поверхностных осадках Баренцева моря

Demina L.L., Alekseeva T.N., Bulokhov A.V.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

On the relationship between elemental and grain-size composition of the Barents Sea surface sediments

Ключевые слова: химические элементы, северные тропи Баренцева моря, банка Ушакова, литолого-геохимические индикаторы

Исследованы концентрации химических элементов и соотношение песчаной и пелитовой фракций в поверхностных донных осадках северной части Баренцева моря. Выявлена приуроченность повышенных содержаний Al и микроэлементов к пелитовой фракции. Показаны противоположные тенденции в пространственном распределении Si/Al и Mn/Fe в зависимости от соотношения песчаной и пелитовой фракций.

Донные осадки служат природным планшетом, позволяющим реконструировать палеосреду осадконакопления в морских бассейнах [1, 2]. Исследование гранулометрического и элементного состава, в частности, тяжелых металлов, поверхностных осадков важно с точки зрения состояния донных экосистем, так как преобладание пелитовой фракции способствует накоплению потенциально токсичных металлов. Закономерности гранулометрического состава верхнего слоя осадков Баренцева моря детально изучены в работе [3], где показано, что основную роль в поставке осадочного материала в северную и восточную части моря играют ледники архипелагов Новая Земля, Шпицберген и Франца-Иосифа, а также айсберговый разнос терригенного материала; гидродинамический фактор влияет на транспорт и накопление осадочного материала. Химический состав терригенных осадков Баренцева моря контролируется соотношением размерных фракций [4, 5].

Целью данной работы является оценка связи концентраций порообразующих и микроэлементов с гранулометрическим составом, главным образом, с пропорцией песчаной и пелитовой фракций, а также тестирование некоторых геохимических индикаторов в осадках северной половины Баренцева моря, которые стали доступными для экспедиционных исследований вследствие таяния льда, наблюдаемого в последнее время. Пробы поверхностных донных осадков были собраны помощью дночерпателя «Океан-50» [6] на 30-ти станциях во время 96-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2024 г.). Станции пробоотбора были

расположены на банке Ушакова, в окраинных трогах Эрик-Эриксона, Квитойя (Орли), Хинлопен, Франц-Виктория (рис. 1).



Рис. 1. Расположение станций отбора поверхностных донных осадков в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2024 г.).

Гранулометрический состав определен водно-механическим анализом [7], тип осадка определяется согласно классификации морских донных осадков Безрукова, Лисицына [8]. Концентрации элементов (Si, Al, Ti, Ca, Sr, Mn, Fe, V, Co, Ni, Cr, Zn, Pb, Zr, As) определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре МАХ-GVM (НПО «Спектрон», Санкт-Петербург). Правильность анализа контролировали с помощью стандартного образца терригенного ила СДО-1.

Как видно из таблицы, в изученных поверхностных донных осадках Баренцева моря валовые концентрации потенциально токсичных тяжелых металлов Pb, Zn и Cr, не превышают региональный фон [9]. Средние концентрации Ni и Co оказались вдвое выше фоновых региональных значений, что может свидетельствовать о влиянии такого антропогенного фактора как добыча и переработка кобальто-никелевых руд на Кольском полуострове. Среднее содержание потенциально токсичного металлоида As в наших пробах (n=30) составляет 54 мкг/г сух. в., что значительно выше его кларка в литосфере (8 мкг/г сух.в.) [10], что обусловлено, по-видимому, атмосферным поступлением продуктов сгорания угля и торфа, обогащенными As. Однако за неимением региональной фоновой концентрации As было бы некорректно считать это загрязнением.

Таблица. Средние концентрации (мкг/г сух. в.) некоторых тяжелых металлов в исследованных осадках в сопоставлении с региональным фоном для Баренцева моря

	Pb	Zn	Cr	Co	Ni
Данная работа (n=30)	17	64	68	27	53
Региональный фон [9]	30	150	70	12	30

В исследуемых осадках трогов Эрик-Эриксона (n=7), Квитойя (n=5), Хинлопен (n=5) и Франц-Виктория (n=2), а также банки Ушакова (n=3) установлена положительная корреляционная связь в различных сочетаниях пар тяжелых металлов и металлоида As (Zn-As, Zn-Pb, Fe-Mn, Fe-As, Mn-As, V-As, Cr-Co, Co-Ni, Ni-Pb и др.) с коэффициентами корреляции r ($p < 0.05$) от 0.36 до 0.78, для пар Fe-Al, Mn-Al (r 0.56 и 0.27 соответственно) и Si-Zr (r 0.40). Это свидетельствует об общности геохимического поведения этих пар элементов в поверхностных осадках. С содержанием пелитовой фракции (< 0.01 мм) положительно коррелируют Al (r 0.69), V (r 0.43), Mn (r 0.54), Pb (r 0.58), Co (r 0.62), As (r 0.57), Ni (r 0.68), Zn (r 0.90) и более слабо Fe (r 0.20). Отрицательную связь с пелитом или ее отсутствие показали Zr ($r = -0.37$) и Si ($r = -0.05$), при этом с содержанием песчаной фракции (> 1 мм) не выявлено значимой связи Zr (r 0.22) и Si (r 0.06). Отрицательная корреляционная связь установлена между Al, перечисленными тяжелыми металлами и As, с одной стороны, и Zr – с другой (r от -0.22 до -0.52). Кроме того, слабая отрицательная связь выявлена между минералообразующими элементами: Si-Al (-0.17), Ca-Al (-0.14). Кальций не показывает четкой тенденции к повышению содержания ни в пелитовой ($r = -0.12$), ни в алевритовой (r 0.02), ни в песчаной (r 0.10) фракциях. Между Ca и Sr отмечена слабая положительная связь (r 0.23). Таким образом, выделяются две литолого-геохимические группы исследованных элементов: 1) микроэлементы и Al, содержание которых значимо возрастает в пелитовой фракции с преобладанием глинистых минералов, 2) Si, Zr, Ca, и Sr, не показывающие тенденции к накоплению как в пелитовой, так и в песчаной фракциях. Наиболее выраженной оказалась корреляционная связь между элементным отношением Si/Al и содержанием песка (r 0.80), в меньшей степени – в паре Zr/Al- песок (r 0.42).

Элементные отношения Si/Al и Zr/Al, повышение которых связано с повышенным содержанием песчаных, крупно- и среднеалевритовых фракций, представленных в основном кварцем, полевыми шпатами и наиболее устойчивым к выветриванию цирконом, считаются геохимическими индикаторами терригенных процессов [11]. В поверхностных осадках исследуемых осадков среднее значение Si/Al составляет 3.51, что близко к таковому для верхней континентальной коры – 3.61 [10] и соответствует преимущественно терригенной природе арктических отложений.

Гранулометрический состав исследованных донных осадков характеризуется пространственной неоднородностью. Наибольшим содержанием песчаной фракции (до 80.1%, в среднем 62.9%) характеризуются относительно мелководные крупнозернистые осадки банки Ушакова (глубина 73–116 м) с низкой долей пелитовой фракции (в среднем 20.3%). Здесь найдены повышенные по сравнению с другими участками средние содержания Si (27.2%), Ca (2.33%), Sr (346 мкг/г) и Zr

(183 мкг/г) и пониженные средние содержания Al (4.51%), Ti (0.21%), Mn (0.02%), Fe (1.61%), и микроэлементов (мкг/г) V (102), Cr (43), Co (19), Ni (37), Zn (19), Pb (10) и As (18). Напротив, в более глубоководных (сред. глуб. 282 м) осадках трога Эрик-Эриксона с максимальным содержанием пелита (до 96.1%, в среднем 86.6%) значительно повышены средние концентрации Al (8.37%), Ti (0.45%), Mn (0.57%), Fe (5.05%), и микроэлементов (мкг/г) V (128), Cr (86), Co (32), Ni (63), Zn (91), Pb (20) и As (74) на фоне пониженного содержания Si (23.9%), Ca (1.21%), Sr (200 мкг/г) и Zr (147 мкг/г). Таким образом, уменьшение доли песчаной фракции относительно пелитовой (песок/пелит) в осадках трога Эрик-Эриксона сопровождается возрастанием концентраций всех микроэлементов, что вполне закономерно обусловлено более высокой удельной поверхностью тонкодисперсных осадков и связанной с этим более высокой адсорбционной способностью микроэлементов и ранее неоднократно отмечалось в литературе. Следует отметить близкое сходство в концентрациях химических элементов и характере корреляционных связей с нашими более ранними данными по поверхностным осадкам на Кольском океанографическом разрезе.

Сопоставление средних значений литолого-геохимических показателей – отношения песчаной к пелитовой фракций (песок/пелит) и отношения Si/Al, свидетельствует о контрастности этих показателей в песчаных осадках банки Ушакова и Эрик-Эриксона с доминированием пелита и отношением песок/пелит = 0.04 (рис. 2). В то же время осадки трогов Эрик-Эриксона, Квитойя, Хинлопен и Франц-Виктория обладают довольно сходными значениями этих показателей.



Рис. 2. Средние значения литолого-геохимических показателей отношения песчаной и пелитовой фракций (песок/пелит) и элементного отношения Si/Al в поверхностных осадках трогов Эрик-Эриксона, Квитойя, Хинлопен, Франц-Виктория) и банки Ушакова.

Элементное отношение Mn/Fe рассматривается как геохимический индикатор условий диагенеза, поскольку изменение концентрации Mn связано с параметром Eh (окислительно-восстановительный потенциал), динамикой скоростей осадконакопления и интенсивностью придонной оксигенации, обусловленной гидродинамикой [11]. В исследованных поверхностных осадках среднее значение Mn/Fe (0.071) значительно

превышает таковое для верхней части континентальной коры (0.022) [10], что, по-видимому, обусловлено более высокой долей пелитовой фракции и повышенным содержанием Mn (0.332%) в морских осадках по сравнению с верхней континентальной корой (0.077%) [11]. Коэффициент корреляции Mn/Fe с содержанием пелитовой фракции в исследованных осадках ($p < 0.05$) составляет 0.50.

Геохимический индикатор Mn/Fe показывает максимум в осадках трога Эрик-Эриксона (0.11) с минимальным отношением песок/пелит и минимум – в осадках банки Ушакова (0.01) (рис. 3). Отсюда следует, что дигенетическое перераспределение элементов в тонкодисперсных осадках трога происходит более интенсивно, чем в песчаных осадках банки Ушакова.

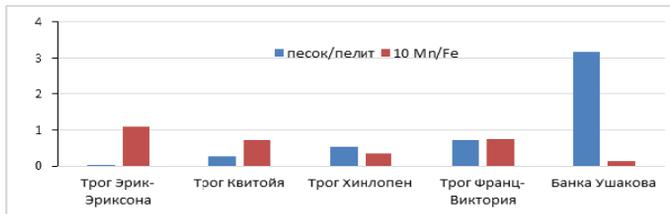


Рис. 3. Средние значения показателей песок/пелит и Mn/Fe в поверхностных осадках четырех трогов и банки Ушакова. Коэффициент 10 в отношении Mn/Fe введен для улучшения графической визуализации.

В пространственной изменчивости индикаторов Mn/Fe (рис. 3) и Si/Al (рис. 2) намечаются противоположные тенденции: с уменьшением показателя песок/пелит значение Mn/Fe существенно возрастает, а Si/Al снижается. Это подчеркивает различия в физико-химических и гидродинамических параметрах в среде осадконакопления.

В поверхностных осадках северных трогов Баренцева моря преобладание пелитовой фракции (< 0.01 мм) способствует накоплению тяжелых металлов и микроэлементов (за исключением Zr), тогда как в мелководных крупнозернистых осадках банки Ушакова их концентрации существенно ниже. Однако гранулометрический состав является важным, но не единственным фактором, определяющим накопление химических элементов в осадках. Полученные данные подтверждают правомочность использования элементного отношения Si/Al в донных осадках северных трогов Баренцева моря как индикатора преобладания песчаной фракции. В пелитовых осадках, где, как правило, повышено содержание лабильного органического углерода, создаются более благоприятные условия для дигенетических процессов, диагностируемых в том числе, и поведением отношения Mn/Fe.

Экспедиционные работы проведены в рамках Госзадания Министерства

образования и науки РФ (тема № **FMWE-2024-0020**), анализ и интерпретация полученных данных поддержаны Российским научным фондом (проект № 25-17-00334).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
2. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. Т. II. / Л.И. Лобковский, Р.И. Нигматулин (ред.). М.: Научный мир, 2014. С. 331–571.
3. Политова Н.В., Алексеева Т.Н., Козина Н.В. и др. Гранулометрический и минеральный состав верхнего слоя осадков Баренцева моря // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. С. 398–415.
4. Гордеев В.В., Демина Л.Л., Алексеева Т.Н. и др. Некоторые геохимические особенности макроэлементного состава поверхностного слоя донных осадков Баренцева моря // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. С. 415–430.
5. Демина Л.Л., Будько Д.Ф., Политова Н.В. и др. Геохимические фракции и индикаторы условий осадконакопления в Баренцевом море // Система Баренцева моря. М.: ГЕОС, 2021. С. 431–443.
6. Новичкова Е.А., Матуль А.Г., Баранов Б.В. и др. Отчет о работе отряда геологии и палеонтологии в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», 25 июля – 31 августа 2024 г. // М.: ИО РАН, 2025. Т. II. С. 50–133.
7. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
8. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в Дальневосточных морях. Тр. Ин-та океанологии. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.
9. Новиков М.А., Жилин А.Ю. Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 78–88.
10. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // The Crust. 2003. V. 3. P. 1–64. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4.
11. Calvert S.E, Pedersen T.E. Elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: Interpretation and application // Developments in Marine Geology. Amsterdam: Elsevier, 2007. V. 1. P. 568–644.

Concentrations of fifteen chemical elements and a sand/pelite ratio in the surface sediment layer of the northern Barents Sea troughs were examined. Confinement of elevated Al and trace elements concentrations to pelitic fractions has been revealed. Opposite trends of the Si/Al and Mn/Fe ratios depending on sand/pelite ratio in spatial distribution were revealed.

Доронин Д.О.¹, Ноговицын Д.Д.², Доронина А.В.¹

(¹ФГУП «ВНИИМ им.Д.И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, e-mail: dd@denisdoronin.ru; ²ФБУ «Якутский ЦСМ»)

Актуальные вопросы метрологического обеспечения добычи россыпей ископаемых остатков мамонтовой фауны на шельфе Арктики

Doronin D.O.¹, Nogovitsyn D.D.², Doronina A.V.¹

(¹D.I. Mendeleev All-Russian Institute for Metrology, Saint-Petersburg; ² FBI « State Regional Center for Standardization, Metrology and testing in the Republic of Sakha (Yakutia)»)

Current issues of metrological support for the extraction of placers of fossil remains of mammoth fauna on the Arctic shelf

Ключевые слова: мамонтовая фауна, шельф, измерения, ископаемые остатки, бивень, сырье

Рассмотрены основные вопросы измерений параметров ископаемых остатков мамонтовой фауны, добываемых на шельфе Арктики. Рассматриваются вопросы разработка комплексной методики измерений параметров добываемого сырья, включая измерения угла Шрегера на поперечном срезе образцов бивней хоботных млекопитающих и измерения цвета бивней, с целью обеспечения соответствия качества сырья требованиям национальных стандартов.

Шельф Арктической зоны Российской Федерации содержит много видов полезных ископаемых, добыча которых обеспечивает суверенитет и безопасность страны. Практически все сырье попадает под действие Федерального закона «О недрах» [1]. Одним из видов сырья, активно добываемого на шельфе арктических морей, являются ископаемые остатки мамонтовой фауны, преимущественно представлен бивнями мамонтов.

В современных прибрежно-морских и аллювиальных осадках, образующихся в результате перемива указанных покровных образований, формируются россыпные скопления бивней мамонта, при этом в ряде случаев количество и качество этого биогенного сырья позволяет оценивать обнаруженные скопления как промышленные месторождения [2]. Наиболее массовая добыча ведется на северякутских россыпях восточноарктического шельфа. Суммарная добыча бивней мамонтов за 2024 г. составила не менее 140 тонн, общей стоимостью более 850 млн. руб. При этом отсутствуют точные и достоверные способы по оценке добываемого сырья и полуфабрикатов из бивней. Согласно Концепции развития сбора, изучения использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны [3], необходимо проведение экспертизы с четко прописанными параметрами сортности для оценки сырья, а также для исключения субъективизма экспертов-оценщиков. Для решения задачи

актуальным становятся вопросы метрологического обеспечения измерений параметров бивней мамонтов, добытых на шельфовых россыпях.

В настоящий момент разработаны окончательные редакции национальных стандартов, содержащих требования к сортности. Дата введения в действие – III квартал 2025 г. Однако для установления соответствия сырья нормированным требованиям необходимо провести измерения характерных параметров бивней, а также обеспечить единство измерений и достаточную точность.

В рамках проведенного научного исследования установлено, что для идентификации сырья, в том числе и таможенного контроля, а именно определения вида хоботного млекопитающего, которому принадлежал бивень или полуфабрикат из бивня (мамонт, слон, морж и т.п.) достоверным признаком является наличие на поперечном срезе бивня линий в дентине, образующих угол Шрегера [4]. В результате 201 измерений были получены результаты распределения значений угла Шрегера на 81 образцах (рисунок).

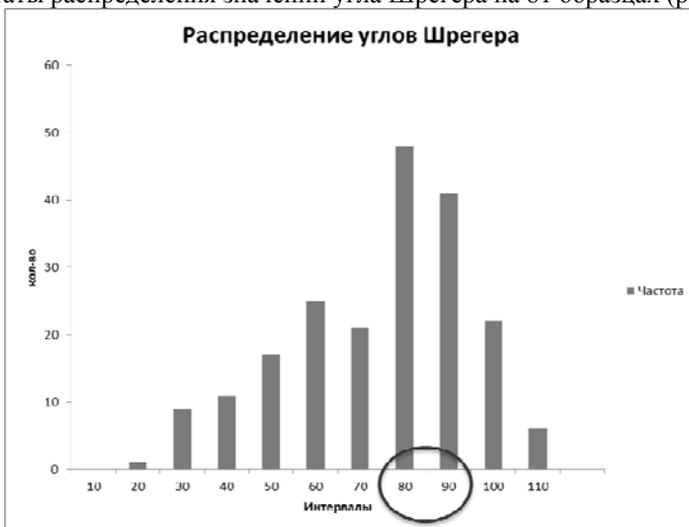


Рисунок. Распределение значений углов Шрегера.

По итогам измерений разработаны основные положения методики измерений углов Шрегера. В настоящий момент методика проходит апробацию.

Вторым значимым параметром является цвет бивня, напрямую влияющий на отнесение образца к высокому или низкому сорту. С целью решения измерительной задачи были разработаны основные положения методики измерений цвета бивней, путем косвенных измерений координат цвета в колористической системе CIELAB, разработанной Международной комиссией по освещению [5]. В результате установлены референтные

значения координат цвета, показатели точности и значения цветового отличия для типичных цветов бивня: белый, белый с кремовым оттенком, бежевый и светло-коричневый. Так как визуально очень сложно определить точно цвет, разработанная методика позволит обеспечить единство измерений координат цвета инструментальным методом, что исключит субъективность при оценке сырья и определения сорта.

Применения рассмотренных методов и внедрение национальных стандартов позволит реализовать комплексную методику оценки сырья и полуфабрикатов из ископаемых остатков мамонтовой фауны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон «О недрах» от 03 марта 1995 г. № 27-ФЗ.
2. Смирнов А.Н. Ископаемая мамонтовая кость. Труды НИИГА-ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ. Т. 201. СПб.: ВНИИОКЕАНГЕОЛОГИЯ, 2003. 172 с.
3. Концепция развития сбора, изучения использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны (утверждена Распоряжением Главы Якутии от 13.08.2018 № 649-РГ).
4. Espinoza E.O., Mann M.J. Identification guide for ivory and ivory substitutes. Baltimore: World Wildlife Fund and Conservation Foundation, 1999. 38 p.
5. Технический отчет Международной комиссии по освещению TR CIE 15:2018 Colorimetry.

The main issues of measuring the parameters of fossil remains of the mammoth fauna mined on the Arctic shelf are considered. The issues of developing a comprehensive methodology for measuring the parameters of the extracted raw materials, including measuring the Schreger angle on the cross-section of samples of tusks of proboscidean mammals and measuring the color of the tusks, are considered in order to ensure that the quality of the raw materials meets the requirements of national standards.

Друщиц В.А.

(Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: vdruschits@yandex.ru)

Предпосылки формирования четвертичных газовых месторождений на континентальных окраинах Арктики

Drouchits V.A.

(Geological Institute RAS, Moscow)

Prerequisites for the formation of Quaternary gas fields on the Arctic continental margins

Ключевые слова: квартал, газовые месторождения, глубоководные конусы выноса, континентальная окраина, Арктика.

По аналогии с данными по известным газовым залежам квартера на ледниковых и внеледниковых окраинах, установлены предпосылки возможности существования подобных образований в зонах распространения глубоководных конусов выноса Арктики.

В последние годы открыто несколько четвертичных месторождений углеводородов на пассивных и активных континентальных окраинах по всему миру. Они расположены в различных климатических и геодинамических обстановках. Эти залежи не крупные по размеру, расположены на небольших глубинах от морского дна, часто используются для снабжения инфраструктуры соседних крупных более древних месторождений и близлежащих агломераций.

Скопления углеводородов квартера образуются при выносе огромного количества обломочного материала к окраине континента. Эти области характеризуются значительными мощностями четвертичных отложений и проградацией шельфа в сторону океана. Распределение материала, приводящее к образованию коллекторов и покрышек, происходит под влиянием изменений природных обстановок квартера и геодинамики региона. Залежи нефти и газа квартера обнаружены в дельтовых образованиях береговой зоны, края шельфа, в ледниковых осадках шельфа, в турбидитах, отложенных на континентальном склоне и его подножии [1].

В течение четвертичного периода на арктической континентальной окраине формировались ледниковые и внеледниковые обстановки, происхождение которых тесно связано с историей их геологического развития. Основной структурой, определяющей развитие большей части Арктической континентальной окраины, в том числе и ледниковых окраин, с позднего кайнозоя до настоящего времени, является Атлантико-Арктическая рифтовая система. Особое положение занимает континентальная окраина моря Лаптевых, развитие которой происходит непосредственно под влиянием хребта Гакеля. Далее простирается область внеледниковых континентальных окраин [2].

Три четвертичных месторождения открыты в морях Северном и Норвежском, и формировались они на ледниковых окраинах, в процессе отступления ледника. Характеристики этих скоплений приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики месторождений, расположенных на ледниковых континентальных окраинах [3, 4].

Характеристики	Возраст (млн. лет)	Глубина положения (м)	Мощность квартера (м)
Пион (Норвежский желоб)	0.2–0.4	384	580
Эвиат (Северное море, палеотрог Кренулейт)	≤ 1.0	81	800
Холтенбанкен (Норвежское море)	1.84	200	1100

Данные четвертичные газовые скопления, видимо, являются уникальными образованиями. Они смогли сохраниться на фоне сокрушительной гляциальной динамики. На большей части шельфов Арктики наблюдаются небольшие (около 100 м) мощности четвертичных осадков. Эти данные подтверждаются материалами бурения, проведенного на шельфе Восточной Арктики в последние годы [5, 6]. Более того, фиксируется мощная эмиссия природного газа на арктических шельфах, обусловленная деградацией многолетнемерзлых пород, тектоническими деформациями, землетрясениями, соляной тектоникой [1, 7]. Исключение относится к шельфу восточной части моря Бофорта, где в плиоцен–четвертичное время отложилось ≥ 4000 м осадков [8]. Однако, в этом случае наблюдается развитие многолетнемерзлых пород (около 700 м), подстилаемых криогенными клатратами, а природный газ аккумулируется в более древних осадках. В море Баффина, в зоне подводного хребта залива Мелвилл миграция газа от эоценовой залежи блокируется гидратами природного газа [9].

Континентальные склоны и абиссаль также не отличаются значительными мощностями квартера. Например, мощность четвертичных осадков в южной части котловины Нансена, на глубине 4000 м, изменяются от 300 до 450 м [10]. При этом в последнее время получены данные по глубоководным конусам выноса, которые по аналогии с известными четвертичными залежами на ледниковых и внеледниковых окраинах могут содержать значительные объемы природного газа. Характеристики таких аккумулятивных тел квартера представлены в табл. 2.

На арктических ледниковых континентальных окраинах широко распространены ледниковые трог и связанные с ними подводные конусы выносы. Для внеледниковых окраин глубоководные конусы выноса связаны

с речным стоком. В море Лаптевых, у подножия континентального склона расположены два конуса выноса. Первый сформировался на глубине 3200 м в процессе поставки ледникового материала с островов архипелага Северной Земли и через пролив Вилькицкого и аллювия рек Анабар и Хатанга (мощность верхнего неоплейстоцена около 80 м) [14]. Второй расположен в области влияния хребта Гаккеля и, вероятно, является конусом выноса рек (Лена, Яна?) с прослоями оползневого материала. Наличие аутигенных карбонатных образований четвертичного времени свидетельствует об активной разгрузке флюидов [15]. Эти данные свидетельствуют о возможности существования крупных газовых скоплений квартера и в прилаптевской зоне котловины Нансена, и в зоне влияния хребта Гаккеля.

Таблица 2. Характеристики глубоководных конусов выноса арктических континентальных окраин [9, 11–13].

Характеристики	Глубина протяжения (м)	Проградация континентальной окраины (км)	Мощность квартера (м)
Медвежий	500–3500	≥ 100	2000–3500
Святая Анна	600–2400	+	2500–3000
Амундсена	800–2400	≥ 20	≥ 1350
Мелвилл	750–2200	≥ 100	≥ 3500
Скорсби	600–2250	≥ 45	2000 ?

Стоит отметить, что в рамках обсуждаемой в последнее время проблемы существования центра оледенения на шельфе Восточной Арктики выделен трог Де Лонга, по которому обломочный материал ледникового происхождения поставлялся к континентальному склону, формируя конус выноса. Мощность отложений на внешнем шельфе превышает 65 м [16]. В состав осадков, формирующих конус выноса Де Лонга, помимо ледникового материала, обломков ледового разноса, морских образований должен входить и вулканический материал четвертичных извержений на островах Де Лонга.

Вышеприведенный материал позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее вероятное формирование четвертичных газовых месторождений можно ожидать в подводных конусах выноса ледниковых континентальных окраин;
- на внеледниковых континентальных окраинах мощные глубоководные конусы выноса образуются при смешанном питании (речной, ледниковый вынос, оползни);
- миграция природного газа к четвертичным коллекторам может блокироваться и многолетнемерзлыми породами, и залежами гидратов природного газа.

Работа подготовлена при финансовой поддержке субсидии по теме госзадания № FMMG-2023-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Друщиц В.А. Газовые месторождения квартера на континентальных окраинах // Бюлл. Комис. по изуч. четв. периода. М.: ГЕОС, 2023. № 81. С. 5–27.
2. Друщиц В.А. Корреляция событий квартера на Арктической континентальной окраине // Бюлл. Комис. по изуч. четв. периода. М.: ГЕОС, 2022. № 80. С. 68–90.
3. Ottesen D., Dowdeswell J. A., Rise L. et al. Large-scale development of the mid-Norwegian shelf over the last three million years and potential for hydrocarbon reservoirs in glacial sediments // Geological Society, London, Special Publications. 2012. V. 368. doi 10.1144/SP368.6
4. 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>.
5. Петров О.В., Никишин А.М., Петров Е.И. и др. Результаты стратиграфического бурения в Восточно-Сибирском море с целью геологического изучения зоны сочленения структур континентального шельфа и глубоководных акваторий Северного Ледовитого океана // ДАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 2. С. 261–271.
6. Малышев Н.А., Вержбицкий В.Е., Данилкин С.М. и др. Стратиграфическое бурение на северо-востоке моря Лаптевых. Основные результаты и дальнейшее развитие проекта // Геология и геофизика 2025. С. 160–179
7. Друщиц В.А. Динамика осадочного материала и разгрузка природного газа на континентальной окраине Арктики // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: ИО РАН, 2023. С. 54–57.
8. Dixon J., Lane L.S., Dietrich J.R. et al. Geological History of the Late Cretaceous to Cenozoic Beaufort-Mackenzie Basin, Arctic Canada. Ch. 17. // The Sedimentary Basins of the United States and Canada. Elsevier, 2019. P. 695–717.
9. Cox D.R., Huuse M., Newton A.M.W. et al. Shallow gas and gas hydrate occurrences on the northwest Greenland shelf margin // Marine Geology. 2021. V. 432. P. 1–21.
10. Engen Ø., Gjengedal J.A., Faleide J.I. et al. Seismic stratigraphy and sediment thickness of the Nansen Basin, Arctic Ocean // Geophys. J. Int. 2009. V. 176. P. 805–821.
11. Patton H., Alexandropoulou N., Lasabuda A.P.E. et al. Glacial erosion and Quaternary landscape development of the Eurasian Arctic // Earth-Science

Reviews. 2024. V. 258. 104936

12. Batchelor C.L., Dowdeswell J.A., Pietras J.T. Evidence for multiple Quaternary ice advances and fan development from the Amundsen Gulf cross-shelf trough and slope, Canadian Beaufort Sea margin // *Marine and Petroleum Geology* 2014. V. 52. P. 125–143.

13. Solheim A., Faleide J.I., Andersen E.S. et al. Late Cenozoic seismic stratigraphy and glacial geological development of the East Greenland and Svalbard-Barents Sea continental margin // *Quaternary Science Reviews*. 1998. V. 17. P. 155–184.

14. Kleiber H.P., Neissen F., Weiel D. The Late Quaternary evolution of the western Laptev Sea continental margin, Arctic Siberia – implication from sub-bottom profiling // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. P. 105–124.

15. Каминский Д.В., Чамов Н.П., Крылов А.А. Первая находка аутигенных карбонатов на прилаптевском фланге хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) // *ДАН*. 2023. Т. 512. № 2. С. 219–224.

16. O'Regan M., Backman J., Barrientos N. De Long Trough: A newly discovered glacial trough on the East Siberian Continental Margin // *Climate of the Past*. 2017. V. 13. Is. 9. P. 1269–1284.

By analogy with data on known gas fields of the Quaternary on glacial and extraglacial continental margins, prerequisites for the possibility of the existence of similar formations in the zones of distribution of submarine fans have been established.

Дубинина Е.О., Косова С.А., Чижова Ю.Н., Авдеенко А.С.
(Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии
РАН, г. Москва, e-mail: elenadelta@inbox.ru)

**Изотопные параметры ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) и соленость
поверхностного слоя морских вод в полярных регионах:
динамическая модель и ее верификация на примере морей
Восточной и Европейской Арктики**

Dubinina E.O., Kossova S.A., Chizhova Yu.N., Avdeenko A.S.
(Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences, Moscow)

**Isotope signature and salinity of marine surface waters in Polar
Regions: a dynamic model and its verification for seawaters of
East and European Arctic**

Ключевые слова: стабильные изотопы, связь δ -соленость, поверхностный слой морской воды, таяние морского льда, модификация вод, опреснение, моделирование

Изотопные параметры ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) и соленость морских вод в полярных регионах определяется балансом процессов опреснения и таяния-замерзания. Последние осложняют применение аддитивных моделей к поверхностным водам. Мы предлагаем динамическую модель поверхностного слоя (DMSL), которая рассматривает его как результат потоков опреснения, замерзания и таяния льда для описания $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и солености в морских водах Арктики. Тестирование модели выполнено для акваторий с разной активностью процессов таяния-замерзания и опреснения, как в зонах действия континентального стока, так и на удалении от них.

На опресненный поверхностный слой морской акватории влияют поступление вод региональных осадков и континентального стока, а в полярных регионах – процессы таяния и замерзания [1, 2]. Все эти процессы влияют на соленость и изотопный ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) состав морской воды, как за счет поступления изотопно-легких атмосферных вод, так и за счет предпочтительного распределения изотопов ^2H и ^{18}O в пользу льда [3, 4]. В полярных районах формирование солености и изотопных характеристик поверхностного слоя воды существенно отличается от низких и средних широт, где большую роль играют процессы испарения. Для описания солености и консервативных изотопных трассеров в поверхностном слое вод низких и средних широт была создана известная модель Крейга и Гордона. В классической работе [5], авторы указывали, что для полярных районов их модель непригодна и требуется «некая другая модель». Создание «некой другой модели» для высоких широт не просто амбициозная задача, но и существенный прогресс в описании наблюдаемых изотопных характеристик полярных вод.

В настоящее время для описания опресненного поверхностного слоя

морской воды в высоких широтах используют модели смешения, в которых роль трассера играют не только изотопы молекулы воды (обычно $\delta^{18}\text{O}$, [6-8]), но и растворенные металлы [9] или биогенные элементы [10, 11]. Морская вода, пресная вода (континентальный сток, осадки) и растаявший морской лед в аддитивных моделях являются конечными членами для расчетов, и выбор их параметров влияет на конечные результаты. Более значимая проблема этих моделей состоит в том, что не только опреснение и таяние льда, но и замерзание часто являются атрибутами одной и той же порции воды, что часто приводит к отрицательным оценкам доли пресного компонента. В ряде работ отрицательная величина этой доли приравнивается к количеству удаленной замерзшей воды (например, [8, 12]), хотя это не является математически очевидным. В качестве альтернативы предлагалось использовать коэффициент модификации [13], знак которого позволяет оценить применимость к изотопным данным моделей смешения, но это лишь частично решает проблему.

Мы представляем новую динамическую модель поверхностного слоя (DMSL), созданную специально для полярных регионов Мирового океана, где замерзание и таяние льда играют ключевую роль. Модель позволяет выделить зоны поверхностных вод, где преобладает либо таяние, либо модификация на фоне опреснения. Кроме того, модель позволяет оценить изотопные параметры пресного компонента, которые в аддитивных моделях задаются искусственно. Для верификации модели были привлечены данные, полученные нами для материалов, собранных во время арктических экспедиций 2017, 2018 и 2021 гг., проведенных ИО РАН им. П.П. Ширшова. Все пробы были собраны в конце летнего сезона, когда влияние процессов ледообразования минимально. Тем не менее, модель позволила установить зоны преимущественной модификации и активного таяния льда в изученных акваториях, а также установить изотопные параметры опресняющего компонента.

Модель DMSL рассматривает поверхностный слой как результат действия входящих и исходящих потоков за время t , начиная с нулевого момента, когда слой содержит только исходную морскую воду (рис. 1). Каждый из потоков характеризуется определенной скоростью (массой или объемом в единицу времени), соленостью и значениями $\delta^{18}\text{O}$ ($\delta^2\text{H}$): F – приток пресной воды атмосферного происхождения; m – поступление вод талого морского льда; i – удаление воды из поверхностного слоя за счет формирования льда; Θ_{in} , Θ_{out} – поступление и возврат воды за счет вертикального переноса при обмене с нижележащей морской водой через галоклин (в DMSL галоклин рассматривается как условная переходная зона между опресненным поверхностным слоем и исходной морской водой).

Для упрощения модели принято, что испарение с поверхности воды не оказывает существенного влияния на ее изотопный состав водорода и кислорода, что не противоречит оценкам роли испарения в Арктике [14].

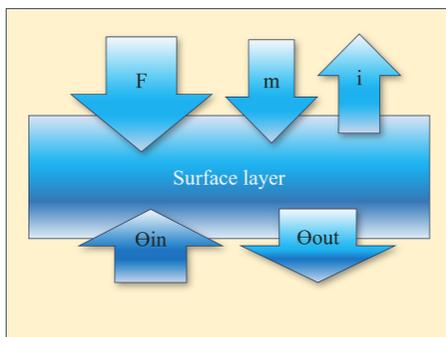


Рис. 1. Принципиальная схема модели DMSL.

Модель DMSL кардинально отличается от моделей смешения по ряду ключевых параметров:

1) В DMSL модели усредненные значения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ пресного компонента являются *результатом* расчета, в отличие от моделей смешения, где эти параметры *задаются*.

2) В DMSL рассчитывается отношение суммы потоков таяния и замерзания к потоку опреснения. Этот комплексный параметр (γ) дает представление о преобладании одного из процессов в формировании вод поверхностного слоя, в отличие от моделей смешения, в которых рассчитываются пропорции смешения вод разного происхождения.

3) В DMSL не требуется ввод характеристик конечных членов, кроме характеристик исходных морских вод и коэффициентов изотопного фракционирования в системе лед–вода, которые могут отличаться от равновесных.

Поступающий пресный компонент в DMSL – это воды, имеющие *неморское* происхождение (атмосферные осадки и континентальный сток). Продукты таяния и замерзания льда рассматриваются как отдельный источник, который может не только уменьшать, но и увеличивать соленость, а также влиять на изотопные характеристики воды поверхностного слоя.

Таким образом, в то время как традиционные модели смешения рассчитывают пропорции компонентов, задавая их конечный состав, модель DMSL рассчитывает изотопный состав опресняющих вод и отношение потока замерзания-таяния к потоку опреснения. Результаты расчета приведены на рис. 2 в виде пространственного распределения основных вычисляемых параметров – изотопного состава опресняющего компонента и индекса γ , равного отношению разницы ($m-i$) к потоку F . Низкие величины $\delta^{18}\text{O}$ пресного компонента показывают зоны влияния материкового стока, а высокие – опреснение летними атмосферными

осадками (рис. 2а). На рис. 2б видно, что даже по окончании безледного сезона в поверхностном слое сохраняются признаки модификации вод, обусловленной не только замерзанием, но и выносом льда из зоны шельфа.

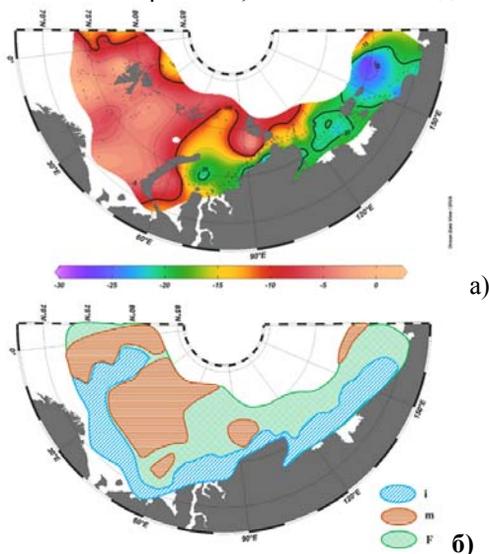


Рис. 2. Распределение величин $\delta^{18}\text{O}$ пресного компонента (а) и зоны, где преобладают опреснение (F), модификация вод (m) и таяние льда (i), протекающие на фоне опреснения (рассчитано по модели DMSL).

Авторы благодарны организаторам рейсов 69, 72 и 84 НИС «Академик Мстислав Келдыш» и 58-го рейса НИС «Академик Иоффе»: М.В. Флинту, М.Д. Кравчишиной и А.А. Осадчиеву, а также капитанам и экипажам судов за предоставленную возможность отбора материала для исследований. Авторы благодарны гидрофизическим группам этих рейсов и А.Ю. Мирошникову за отбор проб воды в рейсе АМК-69. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (проект 23-17-00001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alkire M.B., Morison J., Andersen R. Variability in the meteoric water, sea-ice melt, and Pacific water contributions to the central Arctic Ocean, 2000–2014 // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2015. V. 120. P. 1573–1598.
2. Bauch D., Schlosser P., Fairbanks R.F. Freshwater balance and the sources of deep and bottom waters in the Arctic Ocean inferred from the distribution of H_2^{18}O // *Prog. Oceanogr.* 1995. V. 35. P. 53–80.
3. O'Neil J.R. Hydrogen and oxygen isotope fractionation between ice and water // *J. Phys. Chem.* 1968. V. 72. P. 3683–3684.
4. Lehmann M., Siegenthaler U. Equilibrium oxygen- and hydrogen isotope

fractionation between ice and water // *J. Glaciol.* 1991. V. 37. P. 23–26.

5. Craig H., Gordon L. Deuterium and oxygen-18 variations in the ocean and the marine atmosphere // *Spoletto*. 1965. P. 9–130.

6. Ostlund H.G., Hut G. Arctic Ocean water mass balance from isotope data // *J. Geophys. Res.* 1981. V. 89. P. 6373–6381.

7. Alkire M.B., Falkner K.K., Boyd T. et al. Sea ice melt and meteoric water distributions in Nares strait, Baffin bay, and the Canadian Arctic Archipelago // *J. Mar. Res.* 2010. V. 68. P. 767–798.

8. Bauch D., Holemann J., Andersen N. et al. The arctic shelf regions as a source of freshwater and brine-enriched waters as revealed from stable oxygen isotopes // *Polarforschung*. 2010. V. 80. P. 127–140.

9. Taylor J.R., Falkner K.K., Schauer U. Quantitative consideration of dissolved barium as a tracer in Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. 3374.

10. Ekwurzel B., Schlosser P., Mortlock R. et al. River runoff, sea ice meltwater, and Pacific water distribution and mean residence times in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 2001. V. 106. P. 9075–9092.

11. Schlosser P., Newton R., Ekwurzel B. et al. Decrease of river runoff in the upper waters of the Eurasian Basin, Arctic Ocean, between 1991 and 1996: evidence from $\delta^{18}\text{O}$ data // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V. 29. 1289.

12. Bauch D., Cherniavskaya E., Timokhov L. Shelf basin exchange along the Siberian continental margin: modification of Atlantic water and lower halocline water // *Deep-Sea Res.* 2016. V. 115. P. 188–198.

13. Dubinina E.O., Miroshnikov A.Yu, Kossova S. et al. Modification of the Laptev Sea freshened shelf waters based on isotope and salinity relations // *Geochem. Int.* 2019. V. 57. P. 1–19.

14. Ridley J. K., Blockley E. W., Ringer M. A. Arctic Sea ice causes seasonal differences in the response of Arctic water vapor to climate warming in the CMIP6 model, HadGEM3-GC3.1. // *Geophysical Research Letters*. 2023. V. 50. e2022GL102541.

The surface sea water salinity and isotope ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) composition in polar regions are determined by the balance between freshening and freezing-related processes. Due to sea ice formation and its melting, these parameters cannot be described as an additive model. We propose the dynamic model of surface layer (DMSL), which considers the fluxes corresponding to the freshening, freezing, and sea ice melting in order to describe the $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, and salinity in Arctic seawater. The testing of the DMSL was done for water areas covered with different freezing – melting activity, located both in shelf areas influenced of continental runoff and in areas isolated from it.

Дунаев Н.Н., Кузнецов М.А.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: dunaev@ocean.ru)

Морские берега острова Десепшен (Антарктика)

Dunaev N.N., Kuznetsov M.A.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

The seashores of Deception Island (Antarctica)

Ключевые слова: морские берега, геоморфология, вулканизм, литодинамика, неотектоника, экзогенные процессы

На примере о. Десепшен рассмотрена специфика формирования спрямленных аккумулятивных берегов большой протяженности в условиях вулканизма центрального эксплозивного извержения стромболианского типа и морского субантарктического климата.

Внешнее побережье о. Десепшен за исключением С-В берега почти полностью окружено клифами, преимущественно тектонического и абразионного происхождения. Формирование последних облегчается отсутствием припая в зимние месяцы. Крупные скопления плавучего льда также не задерживаются здесь на длительный срок. Следует отметить, что абразия идет более интенсивно на северо-западном побережье. Это объясняется направлением господствующих ветров и соответственно разницей в характере волнения, обрушивающегося на островное побережье. В целом мористые берега острова распределяются в следующем порядке: северные и западные вулкано-тектонического расчленения, юго-западные эрозионно-тектонические с водно-ледниковой эрозией, формирующиеся преимущественно неволновыми процессами, небольшие участки на юго-востоке абразионно-термоденудационные, локальные участки восточных берегов полигенетические эндогенно-экзогенные, расположенный между мысами Макарони и Бейли Хед (рисунки 1, 2) северо-восточный берег протяженностью 7.2 км – термоабразионно-аккумулятивный. Его спрямленная береговая линия дискуссионно рассматривается с тектонических и гидродинамических позиций [1]. Осадочный материал для формирования абразионно-термоденудационных берегов поступает в основном вследствие дестабилизации пористого грунта в результате оттаивания содержащегося в нем льда и перемещения его в береговую зону под воздействием склоновых процессов, главным образом, солифлюкции и временных водотоков. Впоследствии в ходе нагонов и штормов поступивший материал размывается волнами с образованием данного типа берегов.

По северо-восточному обрамлению острова в условиях голоценового потепления и трансгрессии моря на склоне соммы начал формироваться термоабразионный берег, предопределивший профицит фронтальных

(непосредственно у края ледника) отложений и последующую трансформацию берега в термоденудационный. Накоплению предфронтального (за пределами активного ледника) вулканического дэбриса, из которого синхронно формировался современный аккумулятивный берег и его неполного профиля пляж, способствовали солифлюкционные, флювиогляциальные, гравитационные процессы и временные небольшие водотоки. Крупный механический состав и литология отложений явились существенным волногасящим фактором, который благоприятствовал проградации берега. Что касается его спрямленной значительной протяженности береговой линии, то следует отметить, что в условиях морских акваторий на аккумулятивных берегах далеко не всегда следует видеть тектоническую природу такого их обрамления. Примером может служить юго-восточная береговая линия о. Кайо-Ларге на южном шельфе Кубы. Спрямленный берег между мысами можно наблюдать и в других местах, например, Таируа Бич на о. Северном в Новой Зеландии. В отличие от нашего прежнего мнения о тектонической природе спрямленности рассматриваемой береговой линии [2], ее происхождение может быть обусловлено тем, что большой приток наносов с суши да еще короткий бесснежный период активной прибрежной гидродинамики не дают волнам организовать типичный для ограниченных мысами аккумулятивных берегов вогнутый контур – *log-spiral shape*, как это бывает при заполнении удаленных входящих углов при вдольбереговом переносе наносов. Волны не успевают, их сил хватает только на разнос обломочного материала вдоль берега. При этом контур исходных склонов берега неровный, плавно поворачивает в западном направлении с синхронным расширением его аккумулятивной части вследствие увеличения терригенного сноса, которому здесь свойственна отчетливо выраженная неравномерность. Он незначительный к Ю-В от поперечного левосдвигового разлома привершинной части поднятия Понд, где ледник подходит близко к урезу, и больше к С-З от этого разлома. Здесь рельеф острова заметно понижается, испытывает отепляющее влияние моря, что предопределяет более высокое положение края ледника, развитие водотоков и повышенное поступление осадочного материала в приурезовую зону.

Ветры западных румбов хотя и теряют силу при контакте с островом, но все же могут создавать морские волны, подходящие с косым углом к этому берегу, предопределяя некоторый вдольбереговой перенос рыхлых отложений в Ю-В направлении. Волны С-В направления подходят к берегу близко к нормали и с участием приливов создают преобладание поперечного перемещения наносов, что при примерно равных их объемах к берегу и обратно создают его выровненный край. Противограничная С-В берега опускающаяся блоком идентичного простирания говорит иная ориентация разломов сопредельных территорий Десепшена и акватории. Левосторонний сдвиг, маркируемый водотоком Чечу, разделяет С-В часть

острова на разные структурные и геоморфологические районы: в западном преобладают разрывные нарушения С-В простирания, в восточном – С-З.

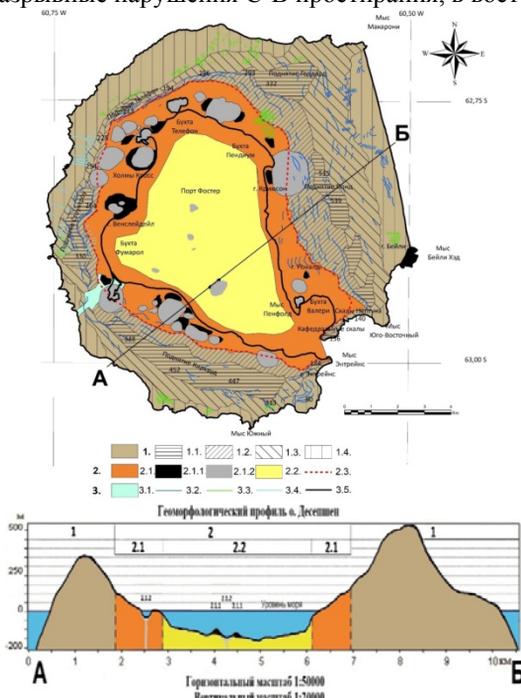


Рис. 1. Геоморфологическая карта и профиль о. Десе́пшен (исходный масштаб 1:50 000)

- Условные обозначения: 1. Сомма: 1.1. Привершинные поверхности, 1.2. Внутренние склоны, 1.3. Внешние склоны, 1.4. Выположенные подножия;
2. Область кальдеры: 2.1. Экзогенно выложенный склон: 2.1.1. Посткальдерные вулканические конусы, 2.1.2. Поскальдерные микрократеры; 2.2. Область кратера, 2.3. Границы кальдеры;
3. Прочие обозначения: 3.1. Структурная седловина, 3.2. Трещины отседания, 3.3. Трещиноватость лавовых потоков, 3.4. Барранкосы, 3.5. Береговая линия.

Условные обозначения 2.1.1. и 2.1.2 по [3].

В целом, к ведущим факторам, определяющим морфологию, экспозицию и динамику морских берегов, относятся тектонический, зонально-климатический и литогенетический. Смена литологической компоненты по прочностным характеристикам обуславливает разную скорость абразии и формирование мелкобухтовых берегов. Обусловленная тектоникой приглубость большинства берегов острова – основная причина отсутствия

пляжей, так как обломочный материал выносится из береговой зоны в акваторию. Поскольку остров тектонически поднимается, береговая линия будет стремиться к выдвигению в море на разных участках с разной скоростью. Однако в случае активизации вулканизма изменение формы северо-восточного берега, равно как и других берегов острова, непредсказуемо.



Рис. 2. Спряmlенный северо-восточный берег о. Десепшен [1].

Вулканизм предопределил литологический состав и генеральные уклоны исходной поверхности побережий острова Десепшен. Неотектонические движения обусловили их геоморфологическую дифференцированность, а климат контролировал субаэральный экзогенез и влияние моря.

Работа выполнена в соответствии с темой Госзадания ИО РАН FMWE-2021-0004

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fernández-Ibáñez F., Pérez-López R., Martínez-Díaz J.J. et al. Costa Recta beach, Deception Island, West Antarctica: a retreated scarp of a submarine fault? // Antarctic Science. 2005. V. 17(3). P. 418–426.

2. Дунаев Н.Н., Брянцева Г.В., Кузнецов М.А. Неотектоническая структура острова Десеппен (Антарктика) по результатам структурно-геоморфологического анализа // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 501. № 2. С. 5–13. doi: 10.31857/S2686739721120045
3. Smellie J.L., Lopez-Martinez J., Headland R.K. et al. Geology and Geomorphology of Deception Island. British Antarctic Survey (BAS). GEOMAP SERIES, Sheet 6A and 6B. Cambridge, 2002. 77 p.

Using the example of Deception Island, the specific formation of large-scale straightened accumulative shores under conditions of central explosive Strombolian-type volcanism and a subantarctic maritime climate is examined.

**Иванов В.В.^{1,2}, Шука А.С.³, Ковалев Г.А.³,
Амбросимов А.К.³, Дроздова А.Н.³, Лукьянова О.А.³,
Артамонова К.В.^{1,4}, Калинин М.А.^{1,3}, Новигатский А.Н.³,
Клювиткин А.А.³, Кравчишина М.Д.³**

(¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: vladimir.ivanov@aari.ru, ²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, ⁴Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Москва)

Термохалинная структура и циркуляция вод в северных краевых шельфовых желобах Баренцева и Карского морей летом 2024 года

**Ivanov V.V.^{1,2}, Schuka A.S.³, Kovalev G.A.³,
Ambrosimov A.K.³, Drozdova A.N.³, Lukianova O.A.³,
Artamonova K.V.^{1,4}, Kalinin M.A.^{1,3}, Novigatskiy A.N.³,
Kluyvitkin A.A.³, Kravchishina M.D.³**

(¹Lomonosov Moscow state university, Moscow, ²Arctic and Antarctic Research institute, St. Petersburg, ³Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, ⁴Russian Federal institute of fisheries and oceanography, Moscow)

Thermohaline structure and circulation in the northern marginal shelf troughs of the Barents and Kara seas in summer 2024

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, водные массы, морские течения, натурные наблюдения, гидрохимические анализы, атлантификация

По данным измерений термохалинных, гидрохимических параметров и скорости течения исследовались процессы водообмена в краевых желобах субмеридионального простираения на севере Западно-Арктического шельфа Евразии в рамках экспедиционной программы ИО РАН «Европейская Арктика: геологическая летопись изменений окружающей среды и климата». Установлено, что сток холодных и опресненных вод через желоба ограничивает дальность восточного распространения вод атлантического происхождения с повышенной температурой, тем самым замедляя атлантификацию бассейна Нансена Северного Ледовитого океана.

Краевые шельфовые желоба образуют важный морфометрический элемент рельефа дна Западно-Арктического шельфа Евразии. Через желоба осуществляется эффективный водообмен между шельфовой и абиссальной зонами Северного Ледовитого океана (СЛО) [1]. Это утверждение в полной мере относится к желобам, расположенным в северных частях Баренцева моря (Квитойя и Франц-Виктория) и Карского моря (Святой Анны и

Воронина), которые составили предмет данного исследования. Летом 2024 г. в экспедиции ИО РАН (рейс АМК–96) на НИС «Академик Мстислав Келдыш» [2] в этих желобах и прилегающих склоновых районах бассейна Нансена были выполнены подробные океанологические разрезы (рисунок). Одновременно с гидрологическими зондированиями и в промежутках между ними проводились измерения судовым ADCP-комплексом (Acoustic Doppler Current Profiler), что позволило получить детальную картину течений и связать между собой выявленные особенности термохалинной и динамической структур.

Измерения температуры, электропроводности и растворенного кислорода выполнялись судовым CTD (Conductivity-Temperature-Depth) зондом SBE-911, производства SeaBird Electronics Inc. Для измерения скорости и направления течений на ходу судна использовался судовый акустический профилограф ADCP TRDI (OS75). По измеренной скорости течения вычислялась баротропная (средняя по вертикали) компонента скорости, а по распределению потенциальной плотности на разрезах – бароклинная компонента. Для последующего анализа в расчетных узлах между CTD-профилями вычислялась нормальная к плоскости разреза компонента суммарной скорости течения. Для определения генезиса пресноводной фракции в составе морской воды анализировалась концентрация флуоресцирующего растворенного органического вещества (РОВ) из отобранных на разных горизонтах проб. Регистрация спектров поглощения и флуоресценции выполнялась на борту судна на спектрофлуориметре «Aqualog» (Horiba) относительно стандарта чистой воды в 1-см кварцевой кювете при комнатной температуре.

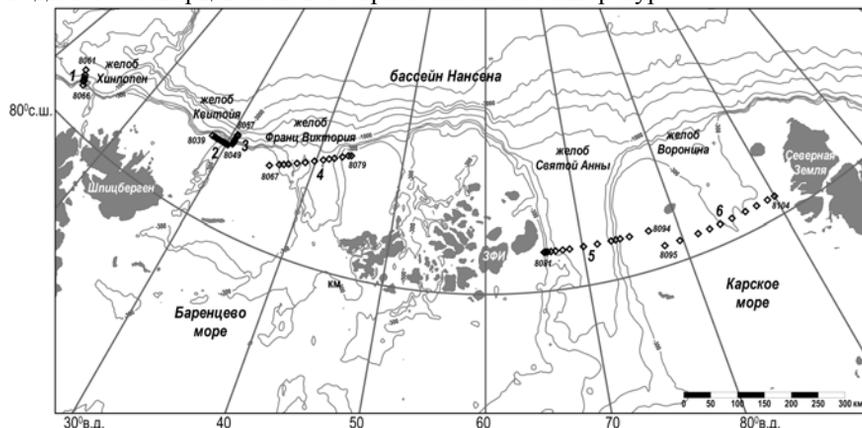


Рисунок. Рельеф дна северных частей Баренцева, Карского морей и прилегающей части бассейна Нансена и расположение станций CTD-зондирования (ромбы).

Выполненный анализ данных измерений на поперечных разрезах через краевые шельфовые желоба субмеридионального простираения (Квитойя, Франц-Виктория, Святой Анны и Воронина) на границах Баренцева и Карского морей с бассейном Нансена позволяет сформулировать следующие выводы:

– Во всех желобах течение из бассейна Нансена вдоль западного склона (входное) меняется на противоположно-направленное течение вдоль восточного склона (выносное). Баротропная компонента течения доминирует над бароклинной за исключением узких фронтальных зон, где вклад бароклинной компоненты может превышать 50%. Средняя скорость течения составляет около 10 см/с, но заметно варьируется в изученных желобах. Наибольшие скорости выносного течения (около 40 см/с) отмечены в желобе Квитойя. В желобе Св. Анны выносное течение с максимальной скоростью (26 см/с) у дна, прижато к восточному склону, а большую часть поперечного сечения желоба занимает входное течение с максимальной скоростью менее 7.5 см/с. В центральной части желоба Франц-Виктория выделяется антициклонический вихрь с орбитальной скоростью менее 5 см/с, предположительно генерируемый над локальным возвышением рельефа дна. В желобе Воронина входное течение смещено от западного склона к оси желоба, что связано с особенностями донной топографии.

– Вертикальная термохалинная структура вод в желобах Баренцева моря (Квитойя и Франц-Виктория) характеризуется наличием двух основных водных масс: поступающей из бассейна Нансена ФАВ (Фрамовской Атлантической воды) и выносимой из желобов в бассейн вФАВ (возвратной ФАВ). Границы между этими водными массами надежно выделяются по характерным значениям температуры, солёности и растворенного кислорода. В желобе Св. Анны место вФАВ в выносном потоке занимает БАВ (Баренцевоморская Атлантическая вода), содержащая глубинную и придонную компоненты. В желоб Воронина ядро ФАВ практически не попадает, но максимум температуры (около 0°C) в поступающей из бассейна водной массе указывает на наличие в ней некоторой фракции ФАВ. Поверхностный слой в изученных желобах занимает вода с положительной температурой, опресненная при сезонном таянии льда. Между поверхностным слоем и ФАВ/вФАВ/БАВ расположен холодный промежуточный слой, сформированный в результате зимней халинной конвекции.

– Расход прибрежной ветви Западно-Шпицбергенского течения (ЗШТ) для воды с температурой более 2°C (2.88 Св), рассчитанный по данным измерений на разрезе к западу от желоба Хинлопен, более, чем вдвое превышает величину, полученную ранее по долговременным измерениям на кластере автономных буйковых станций (АБС) в восточной части пролива Фрама [3]. Различие может быть связано как с недостаточным

пространственным разрешением АБС, так и с разовым характером измерений, на основе которых была получена представленная в данной статье оценка. Объемный сток через все желоба (за исключением желоба Квитойя) превышает поступление воды из бассейна Нансена. Сравнительно небольшой суммарный водообмен через желоб Св. Анны (0.56 Св) вызывает вопрос о генезисе вод, выносимых через этот желоб в бассейн Нансена, и традиционно относимых к БАВ.

– Значительно повышенная, по сравнению со среднемноголетней в июле-августе, температура воды на повторяющемся разрезе 3 (к востоку от желоба Квитойя) свидетельствует о появлении очередной термохалинной аномалии, принесенной ЗШТ в бассейн Нансена. При этом сравнительно низкие значения солености могут указывать на то, что происхождение этой аномалии температуры воды не связано напрямую с адвекцией из субполярной Северной Атлантики.

– Массированный вынос вод из желобов Баренцева моря приводит к смещению ядра ФАВ от континентального склона в глубоководную часть бассейна с глубиной до 3000–3500 м. Это происходит вследствие механического импульса, создаваемого массой вФАВ, вытекающей из желобов, а также благодаря охлаждению и опреснению части ФАВ, находящейся ближе к континентальному склону, при перемешивании через фронт, отделяющий ФАВ от вФАВ. К востоку от желоба Св. Анны место вФАВ вблизи континентального склона занимает выносимая из желоба Св. Анны водная масса, которую условно интерпретируем как БАВ, основываясь на общепринятых представлениях о циркуляции. В итоге, внешняя ветвь ФАВ, в которой локализован абсолютный максимум температуры, оказывается на периферии Арктического пограничного течения (АПТ), где скорость течения на порядок величины меньше, чем у континентального склона.

В целом, наличие стока холодных и опресненных вод через желоба Баренцева и Карского морей ограничивает дальность проникновения ФАВ с аномально высокой температурой вдоль АПТ, т.е. является фактором, тормозящим дальнейшую атлантификацию [4] бассейна Нансена. На основании представленных выше выводов и принимая во внимание публикации, свидетельствующие о повышении температуры воды Баренцева моря в последние 20 лет [5, 6], можно осторожно предположить, что при сохранении текущей тенденции потепления на Западно-Арктическом шельфе Евразии эффективность охлаждения ФАВ за счет стока через желоба субмеридионального простирания будет постепенно снижаться.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>. Авторы

признательны экипажу судна, а также Е.А. Марчук (ИФА РАН), А.Л. Чульцовой, Н.И. Торгуновой, Ю.В. Мурзаковой и А.О. Варваровой за помощь в экспедиции.

Обработка и анализ представленных материалов выполнены за счет гранта РФФ № 24-17-00041; экспедиционные исследования – в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Нерешенные проблемы океанологии Арктики // Опыт системных океанологических исследований в Арктике / А.П. Лисицын, М.Е. Виноградов А.Р. и Е.А. Романкевич (ред.). М.: Научный мир, 2001. С. 31–74.
2. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н и др. Апробация системы мониторинга климата на основе заякоренных платформ, обсерваторий и судовых наблюдений в 96-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // Океанология. 2025. Т. 65. № 3. С. 514–517.
3. Beszczynska-Moeller A., Fahrbach E., Schauer U., Hansen E. Variability in Atlantic water temperature and transport at the entrance to the Arctic Ocean, 1997–2010 // ICES Journal of Marine Science. 2012. V. 69. P. 852–863.
4. Ivanov V. Arctic Sea Ice Loss Enhances the Oceanic Contribution to Climate Change // Atmosphere. 2023. V. 14. 409. <https://doi.org/10.3390/atmos14020409>.
5. Lind S., Ingvaldsen R.B., Furevik T. Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea–ice import // Nature Climate Chang. 2018. V. 8(7). P. 634–639.
6. Сумкина А.А., Смирнов А.В., Кивва К.К., Иванов В.В. Относительные вклады теплообмена на границе моря и атмосферы и адвективного переноса тепла в повышение температуры вод Баренцева моря в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2024. Т. 70(3). С. 310–322. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-3-310-322>

Using measurements of thermohaline, hydrochemical parameters, and current velocities, water exchange processes in submeridional marginal troughs in the northern West Arctic Shelf of Eurasia were studied as part of the Institute of Oceanology RAS expedition program "European Arctic: A Geological Record of Environmental and Climate Change." It was found that the flow of cold and freshened waters through the troughs limits the eastward spread of warmer Atlantic waters, thereby slowing the atlantification of the Nansen Basin of the Arctic Ocean.

Иванов М.В., Алаторцев А.В., Аксентов К.И.

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток,
e-mail: kirov-max@mail.ru)

Распределение ртути в донных осадках восточной Арктики

Ivanov M.V., Alatorstsev A.V., Aksentov K.I.

(V.I.Ilichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok)

Distribution of mercury in bottom sediments in the eastern sector of the Arctic

Ключевые слова: Ртуть, донные осадки, геоэкология, Арктика, Восточно-Сибирское море, море Лаптевых

Изучено содержание ртути в донных осадках Восточно-Сибирского, Лаптевых, Чукотского морей и примыкающей части Северного Ледовитого океана. Установлена зависимость содержаний ее от гранулометрического состава осадков и редокс-условий придонных вод, что в общем виде проявляется как батиметрическая зональность распределения.

Быстрые климатические изменения наиболее чутко проявляются в арктическом регионе. Наблюдаемое изменение климата создает перспективы для освоения территорий высоких широт и интенсификации эксплуатации Северного Морского пути, что неизбежно приведет к поступлению загрязняющих веществ в прибрежные акватории и накоплению их в донных осадках. Наиболее информативной частью водных систем с позицией оценки степени их устойчивого загрязнения являются донные осадки, несомненно связанные со всеми другими компонентами и способные аккумулировать вклады различных источников. Типичные содержания ртути в донных осадках на 3–4 порядка выше, чем в воде. Это снимает многие аналитические трудности и делает, как правило, оценку картины загрязнения бассейна по донным осадкам существенно более надежной, чем по воде.

Чукотское море, Восточно-Сибирское, море Лаптевых и прилегающая часть Северного Ледовитого океана отличаются от других арктических бассейнов тем что, находясь в большой удаленности от районов с развитой промышленностью и в бассейнах рек, впадающих в этой регион, отсутствуют промышленные объекты. Районы исследования расположены вне зоны влияния трансграничного переноса ртути от техногенных источников в странах Юго-Восточной Азии, что делает его весьма благоприятным для изучения природного поступления ртути в донные осадки.

В работе использованы пробы донных осадков, отобранные в экспедициях на НИС «Профессор Хромов» в 2002, 2004, 2009 гг., ГИСУ «Север» в 2006 г., МБ «Шуя» в 2006 г., НИС «Академик М.А. Лаврентьев» в

2008, 2016, 2018, 2020 гг., НЭС «Сомов» в 2020 г. Пробы отбирались дночерпателями, бокс-корером, гравитационными и гидростатическими трубками различной длины.

Для определения ртути, использовался анализатор ртути РА-915М+ с пиролитической приставкой ПИРО-915+. Нижний предел обнаружения – 0.5 нг/г. Погрешность анализа составляла 2–3%. Стандартными образцами на ртуть служили ГСО 7183-95, СПДС-1,2,3, HISS-1, MESS-4, PACS-3, BCR-277R. Внешний контроль ежегодно выполнялся в лаборатории фирмы-производителя (ООО Льюмэкс, г. Санкт-Петербург). Статистические параметры распределения были определены с помощью программы GeoStat.

В результате обработки данных было установлено, что содержание ртути изменяется с батиметрическим уровнем (рис. 1). Район исследований характеризуется выборкой 627 проб поверхностных донных осадков (0–5 см), которые подразделяются на 2 группы: 1) до глубин 100 м (n=495) и 2) в интервале глубин 100–2600 м (n=132). Содержания ртути для данного района варьирует от 5 до 95 нг/г. При среднем и медианном содержании 33 и 30 нг/г соответственно. За фоновое содержание принято значение медианы, что хорошо согласуется с ранее определенным фоном, который составляет 30 нг/г для донных осадков Чукотского моря и прилегающей части Северного Ледовитого океана [3].

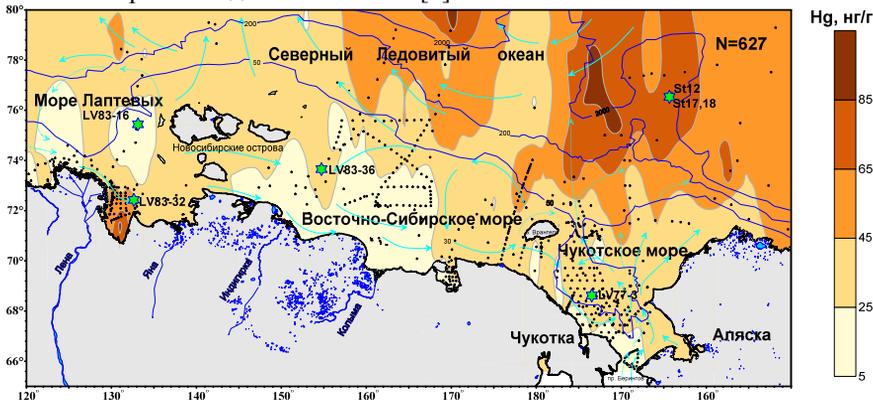


Рис. 1. Содержания ртути (нг/г) в поверхностных донных осадках Чукотского, Восточно - Сибирского, Лаптевых морей и прилегающей часть Северного Ледовитого океана. Точками показаны станции отбора. Изолиниями рельеф дна (м). Точками показаны станции отбора. Изобаты (синий цвет) показывают главные черты рельефа дна (м). Голубыми стрелками показаны основные течения.

Основным фактором, определяющим изменчивость содержания ртути в донных осадках, является наличие окисленных или восстановленных осадков. Превышение над фоном в 3–6 раза характерно для глубоководной

части (глубина около 2600 м) района (рис. 1), где распространены окисленные осадки [1]. В мелководной части (0–100 м) море Лаптевых Чукотского и Восточно-Сибирского морей, где распространены восстановленные осадки различного состава, содержания ртути значительно меньше, однако также прослеживается влияние р. Лены. Необходимо учитывать, что поступление терригенного органического вещества в море определяется продуктами термической и волновой абразии материала берегового ледового комплекса. В пробах поверхностных донных осадках, отобранных в устье р. Лены в 2008–2009 гг., были получены аналогичные содержания ртути [4]. Так же повышенные содержания на станции LV77-32 в центральной части Восточно-Сибирского моря связаны с наличием на дне скопления железо-марганцевых конкреций.

Подобная картина распределения ртути в поверхностных донных осадках характерна для других районов Арктики с природными источниками ее поступления. В центральной части Северного Ледовитого океана, где распространены окисленные осадки [1] содержания ее составляют 80–100 нг/г, в поверхностных осадках прибрежной части моря Бофорта составляют – 20–100 нг/г, прибрежной части Восточно-Сибирского и моря Лаптевых – 20–40 нг/г, в районе устья крупных рек около 60–80 нг/г [5, 6].

Исучаемые колонки донных осадков сложены в основном алеврито-пелитовыми частицами, доля песка увеличивается в отложениях, распространенных на внутреннем шельфе в зонах влияния крупных рек (Лена, Индигирка, Колыма). Окисленный слой (от коричневого до светло-коричневого) залегает в поверхностных горизонтах мощностью от первых сантиметров на внутреннем шельфе и до 30–50 см на внешнем шельфе и склоне. Доля биогенных компонентов (диатомовые, радиолярии, спикулы губок) возрастает в донных осадках Чукотского моря. Современные скорости осадконакопления на внутреннем шельфе составляют 0.15–0.20 см/год, на внешнем шельфе и глубоководных частях уменьшаются до 0.02–0.05 см/год [2]. Содержания ртути в колонках St12, St17 и St18, отобранной в глубоководном районе (глубина 585–635 м.) Северного Ледовитого океана составляют от 5 до 300 нг/г (рис. 2). В пределах этого района отмечены максимумы содержания Hg в колонках донных осадков, приуроченные к зоне покмарков на Чукотском плато в пределах кайнозойской рифтогенной структуры «рифт Норсвилд» с глубинами 570–680 м. Установлено, что здесь могли в прошлом иметь место разгрузки газосодержащих флюидов. Большое поле поверхностных осадков с содержанием ртути более 80 нг/г находится на материковом склоне в районе выхода на него с континентальной части неотектонических структур мезозойской грабен-рифтовой системы Чукотского моря, а с океанической – кайнозойской рифтогенной структуры [1]. В колонках LV77-36 (Восточно-Сибирское море), LV83-16 (море Лаптевых), LV83-32 (море Лаптевых) и LV77-3

(Чукотское море) расположенных на шельфе, содержания ртути значительно меньше, около 25 нг/г (рис. 1).

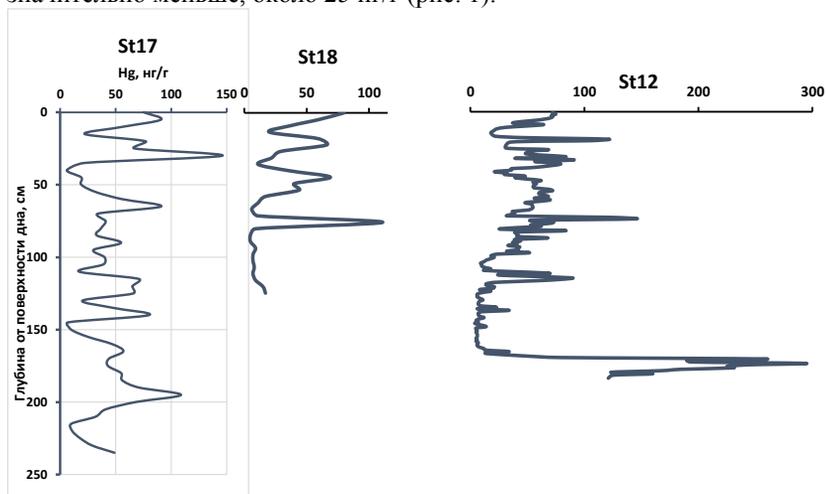


Рис. 2. Содержание ртути (нг/г) в колонках донных осадков.

Результаты исследований показали, что основным фактором, определяющим изменчивость содержания ртути в поверхностных донных осадках и ядрах исследуемого района, является наличие окисленных или восстановленных осадков. Так же, как и для других морей Арктики, содержания ртути зависит от гранулометрического состава донных осадков

Антропогенное загрязнение осадков ртутью нами не отмечено, но нельзя исключать, что какая-то ее часть, поступающая с речными водами р. Лены и накапливающаяся в мелководной части моря Лаптевых, может иметь антропогенное происхождение.

Автор благодарит главного научного сотрудника ТОИ ДВО РАН д.г.-м.н. Астахова А.С. за помощь в выполнении экспедиционных и аналитических работ.

Исследования выполнены за счет средств госбюджетной темы № 124022100081-7

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов А.С., Босин А.А., Колесник и др. Геологические исследования в Чукотском море и примыкающих районах Северного Ледовитого океана в экспедиции RUSALCA-2009 // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 6. С. 110–116.
2. Астахов А.С. и др. Ледовые условия Чукотского моря в последние столетия: реконструкции по седиментационным записям // Докл. РАН. 2018.

Т. 480. № 4. С. 485–490.

3. Иванов М.В. Ртуть в донных осадках окраинных морей северо-восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2014. № 4. С. 63–74.

4. Иванов М.В. Ртуть в поверхностных донных осадках моря Лаптевых.// Строение литосферы и геодинамики: Материалы XXIV Всероссийской молодежной конференции. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2011. С. 95–96.

5. Экологический атлас Арктики. 2000. <http://www.arctic.noaa.gov/aro/atlas/>

6. West G. et al. Late Holocene Paleomagnetic Secular Variation in the Chukchi Sea, Arctic Ocean // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2022. V. 23. № 5. e2021GC010187.

The mercury content in the bottom sediments of the East Siberian, Laptev, Chukchi seas and the adjacent part of the Arctic Ocean was studied. The dependence of its contents on the granulometric composition of sediments and redox conditions of bottom waters is established, which generally manifests itself as the bathymetric zonality of the distribution.

**Козина Н.В., Матуль А.Г., Баранов Б.В., Цуканов Н.В.,
Якимова К.С., Сломнюк С.В., Володин В.Д., Драздова А.В.,
Козлов А.А., Кравчишина М.Д.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:
kozina_nina@bk.ru, kozina@ocean.ru)

**Литолого-геохимические и микропалеонтологические
исследования донных осадков Баренцева и Карского морей
в 93-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш»**

**Kozina N.V., Matul A.G., Baranov B.V., Tsukanov N.V.,
Yakimova K.S., Slomnyuk S.V., Volodin V.D., Drazdova A.V.,
Kozlov A.A., Kravchishina M.D.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Multidisciplinary geological studies of the bottom sediments of
the Barents and Kara Seas during the 93rd cruise of the R/V
"Akademik Mstislav Keldysh"**

Ключевые слова: донные осадки, палеоокеанология, диагенез, железомарганцевые конкреции, Карское море, Баренцево море, покмарк, контуритовый дрейфт.

Геологические работы в 93-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в 2023 г. охватывали исследования в Печорском и Баренцевом морях, а также в Байдарацкой губе Карского моря. Основная цель исследований – изучение современной и древней седиментации в морях западной части Российской Арктики. В ходе работ исследованы морфологические структуры дна, получены данные о распределении аккумулятивных осадочных тел, получен материал для высокоразрешающих реконструкций взаимодействия североатлантической и арктической воды. Проведены литолого-геохимические исследования донных осадков и процессов раннего диагенеза.

Комплексные геологические работы проводились в экспедиции «Европейская Арктика–2023: геологическая летопись изменений окружающей среды и климата» в 93-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» в ноябре–декабре 2023 г [1]. Районы исследования включали в себя Печорское и Баренцево моря, а также Байдарацкую губу Карского моря (рис. 1). Основными задачами работ геологического отряда являлось изучение современной и древней седиментации, получение материала для высокоразрешающих палеореконструкций взаимодействия североатлантической и арктической воды во внутренних частях морей западного сектора Российской Арктики, изучение морфологических структур дна, изучение расположения, строения, состава и возраста отложений осадочных тел (дрифтов), исследование процессов диагенеза и аутигенного минералообразования, в том числе, в акваториях с признаками

дегазации осадочной толщи.

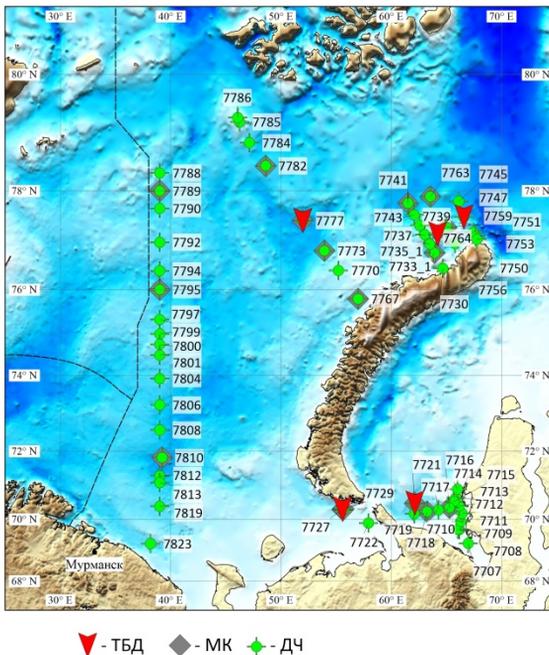


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб осадков в 93-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», 2023 г.

Для отбора проб донных осадков использовались: дночерпатели «Океан-50», мультикорер Mini Musc К/МТ 410 и ударная трубка большого диаметра (ТБД). После отбора донных осадков на борту судна проводилось: литологическое описание осадков, исследование спектрофотометрическим и магнитометрическим методами, определение pH и Eh и первичные литолого-минералогические исследования. В стационарной лаборатории выполнено изучение колонок с помощью автоматизированной системы комплексного исследования кернов (MSCL-XYZ GEOTEK), позволяющей получать детальную информацию о литологических характеристиках осадков, включая цвет и текстурные особенности, а также изучить распределение химических элементов.

В Печорском море получены данные о распределении аккумулятивных осадочных тел – контуритовых дрефтов, обнаруженных в Южно-Новоземельском прогибе. Изменчивость в строении дрефта вероятно, обусловлена морфологией склона и вариациями в скорости придонного течения. Наличие в прогибах контуритовых дрефтов подтверждает высказанное ранее предположение о том, что в послеледниковое время

здесь доминируют процессы аккумуляции осадков, а сами прогибы являются крупными ловушками осадочного материала [2]. Вскрыта осадочная толща контуритового дрифта мощностью 551 см (ст. 7727). В интервале 435–438 см в восстановленных осадках, пелите алевритовом, был обнаружен икаит. Икаит представлен крупным кристаллическим агрегатом размером 6.5x3x2.5 см с хорошо выраженными гранями и спайностью по разным плоскостям. Цвет икаита – янтарный, медово-желтый. Предположительно осадки относятся к голоцену.

В Баренцевом море проведены исследования на северо-восточном склоне плато Литке, изучена депрессия диаметром ~250 м и глубиной 10–12 м. На меридиональном профиле вдоль 39 градуса в.д. в Баренцевом море были подняты железомарганцевые конкреции (ЖМК) и корки. В результате первичных исследований установлено, что размеры и форма ЖМК, отобранных в ходе рейса, а также глубины их залегания в осадке различаются. Обнаружены ЖМК разных морфологических типов: плоские, блюдце- и тарелкообразные иногда с кольцами роста; чашеподобной формы; неправильной, часто уплощенной формы; трубкообразные; желвакоподобной формы; коркоподобные. На поверхности конкреций отмечено наличие биогенных остатков и следов жизнедеятельности микроорганизмов. Особенности литолого-фациальных условий привели к образованию различных морфологических типов ЖМК.

В Баренцевом море отобрано 3 колонки ТБД. Колонка 7747 вскрывает в верхней части (0–24 см) морские отложения: пелит алевритисто-песчаный с линзами песка и примесью обломочного материала ледового происхождения, а также песок алевритово-пелитовый с включениями обломочного материала ледового происхождения. На 24 см отмечена резкая граница, смена условий осадконакопления и осадок представлен очень плотной мореноподобной глиной (гляциосуспензитом) с примесью большого количества обломочного материала ледового происхождения. По данным магнитной восприимчивости осадка отмечена резкая граница на 24 см. Изучение колонки с помощью автоматизированной системы MSCL-XYZ (GEOTEK) показало, что в колонке 7747, предположительно, верхний слой (0–24 см) представлен голоценовыми осадками, а нижний слой (24–45 см) – ледниковыми плейстоценовыми осадками.

Колонка 7764, отобранная в Баренцевом море, вскрывает отложения мощностью 114 см, которые в верхней части (0–46 см) представлены пелитом алевритовым с включениями обломочного материала ледового происхождения. На глубине 46 см отмечена резкая граница, где осадок представлен глиной с включениями песчаного и алевритового материала в виде прослоев, микропрослоев, линз, а также характерных для этой толщи включений обломочного материала (большое количество неокатанных обломков пород). Глина уплотняется к основанию колонки. В интервале 57–69 см текстура осадка пятнистая, глубже в осадке отмечена слоистая

текстура. Авторы предполагают, что прослои, микропрослои и линзы песка могут быть связаны с мутьевыми потоками, а слоистость в осадке обусловлена ярко выраженной сезонностью.

Колонка 7777, отобранная в Баренцевом море, имеет мощность 195 см. Верхняя ее часть представлена пелитом алевритистым с включениями гидротроилита. В интервале 155–(171.5–174) в осадке отмечена слоистая текстура и микропрослои песка. На 171.5–174 см – резкая косая граница, ниже которой осадок представлен песком хорошо сортированным и сильно обводненным. Авторы полагают, что такая резкая смена литологического состава осадка обусловлена перемывом моренных отложений. Кроме того, есть основания считать, что микропрослои песка формировались потоками и течениями с высокими скоростями переноса.

Корреляция этих 3-х осадочных разрезов позволила предварительно оценить возраст колонок на основе литологического описания и данных магнитной восприимчивости. Высокие значения магнитной восприимчивости служат надежным признаком отложения осадков в конце позднеледниковья и раннего голоцена в Карском и Баренцевом морях в интервале 10.5–12.7 тыс. лет назад [3–4]. Если принимать такую трактовку, то средняя скорость осадконакопления составляет 2, 5 и 11 см/1000 лет для колонок 7747, 7764 и 7777, соответственно.

В Карском море отобрана колонка 7721, которая имеет мощность 495 см. По предварительной оценке, колонка охватывает интервал последних 14.6 тыс. лет в пределах терминации I (период терминального плейстоцена) и голоцена, следовательно, обеспечивает описание местных палеоокеанологических событий во всем послеледниковом интервале времени. При дальнейшем анализе колонки с частотой каждый 1 см разреза можно добиться данных по палеоокеанологическим реконструкциям ключевых событий с очень высоким временным разрешением до первых десятков лет.

Радиохимические исследования осадков показали, что на северных разрезах (станции 7730–7753), близлежащих к северной оконечности Новой Земли наблюдалась повышенная радиоактивность, быстро спадающая по мере удаления от берега. Природа этой радиоактивности требует дальнейшего изучения и анализа отобранных проб. Измерения радиоактивности осадков выполнялись ручным сцинтилляционным радиометром на расстоянии 10 мм от пробы непосредственно на палубе в днорепателе.

Таким образом, было получено пять новых разрезов колонок донных отложений Карского, Печорского и Баренцева морей, анализ которых позволяет выполнить детальную реконструкцию осадконакопления и истории развития природных систем на морской окраине Российской Арктики за последние 10–15 тыс. лет. Исследование этих колонок позволит в дальнейшем получить новую информацию о смене региональных

климатических трендов в последние тысячелетия, чтобы улучшить понимание развития природной среды при современном глобальном потеплении. Исследования аутигенных минералов и условий их образования в донных отложениях позволят выявить ряд ведущих факторов, определяющих процессы седименто- и диагенеза в данном районе. Получен уникальный материал, изучение которого позволит дополнить и уточнить информацию о процессах современного и древнего седиментогенеза в исследуемых районах.

Авторы выражают благодарность Клювиткину А.А. и Новигатскому А.Н. за организацию работ и помощь при отборе осадков, всем членам научного состава экспедиции, а также капитану Горбачу Ю.Н. и экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш». Экспедиционные исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН».

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0020.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кравчишина М.Д., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. 93-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» геосистемы западно-арктического шельфа Евразии в сезон активного развития осенне-зимней конвекции и полярной ночи // *Океанология*. 2024. Т. 64. № 4. С. 731–734.
2. Митяев М.В., Хасанкаев В.Б., Голубев В.А. Желоба Баренцева моря – современные каналы транспортировки или ловушки осадочного вещества? // *Арктика и Антарктика*. 2007. Вып. 5(39). С. 72–79.
3. Polyak L. et al. Variations in the influence of riverine discharge on the Kara Sea during the last deglaciation and the Holocene // *Global and Planetary Change*. 2002. V. 32. P. 291–300.
4. Polyak L. et al. The impact of glaciation, river-discharge, and sea-level change on Late Quaternary environments in the southwestern Kara Sea // *Int. J. Earth Sci.* 2000. V. 89. С. 550–562.

Geological works during the 93rd cruise of the R/V *Akademik Mstislav Keldysh* (AMK) in 2023 covered research areas in the Pechora and Barents Seas, as well as in the Baydaratskaya Bay of the Kara Sea. The primary objective of the research was to study modern and ancient sedimentation in the seas of the western Russian Arctic. In the course of the work, the morphological structures of the bottom were studied, data on the distribution of accumulative sedimentary bodies were obtained, and material was obtained for high-resolution reconstructions of the interaction of North Atlantic and Arctic waters. Lithological and geochemical studies of bottom sediments and processes of early diagenesis have been carried out.

**Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Дара О.М., Кравчишина М.Д.,
Филиппов А.С.**

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

kozina_nina@bk.ru, kozina@ocean.ru)

**Новые данные о железомарганцевых и карбонатных
конкрециях в донных отложениях Карского моря (район
Ленинградского газоконденсатного месторождения)**

**Kozina N.V., Reykhard L.Ye., Dara O.M., Kravchishina M.D.,
Filippov A.S.**

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**New data on iron-manganese and carbonate concretions in the
bottom sediments of the Kara Sea (the Leningradskoye gas
condensate field area)**

Ключевые слова: марганцевые конкреции, кутногорит, донные осадки, Карское море, диагенез, аутигенные минералы, оптическая микроскопия, рентгеновская дифракция, восстановленные осадки

В донных осадках Карского моря в районе Ленинградского газоконденсатного месторождения обнаружены железомарганцевые и карбонатные конкреции разных морфологических типов. Проведены литолого-минералогические исследования конкреций, отобранных из колонки осадков. Установлено, что железомарганцевые конкреции сложены преимущественно бузеритом I и бернесситом и другими 10Å гидроксидами марганца. В составе карбонатных конкреций установлено высокое содержание кутногорита.

Осадконакопление в Карском море – сложный и динамичный процесс, находящийся под сильным влиянием множества факторов: мощного речного стока крупных сибирских рек Оби и Енисея, ледовых процессов, рельефа дна и течений. Для осадочного процесса в Северном Ледовитом океане (СЛО) и его морей, в том числе, Карского моря, характерен ледовый морской тип седиментогенеза. В Карском море господствуют терригенные осадки, которые отличаются по способам подготовки осадочного вещества, его транспортировки и отложения. Ленинградское газоконденсатное месторождение расположено в юго-западной части Карского моря на континентальном шельфе России.

В настоящей работе обсуждаются первые результаты изучения железомарганцевых и карбонатных конкреционных образований в донных отложениях Карского моря в районе Ленинградского газоконденсатного месторождения.

Как известно, железомарганцевые конкреции являются одним из важнейших потенциальных источников минерального сырья в морской среде. Железомарганцевые конкреции – это не только источник марганца,

для них характерны и высокие концентрации ряда других металлов (Ni, Cu, Co, Zn, Mo, Li, PЗЭ), важных для промышленности и микроэлектроники, в частности. Запасы некоторых металлов в конкрециях на дне океана значительно превышают все разведанные запасы на суше [1]. Данная работа продолжает цикл исследований авторов по аутигенному минералообразованию и диагенетическим процессам в донных отложениях арктических морей [2–5 и др.].

Материалом для исследования послужили донные осадки, отобранные в районе Ленинградского газоконденсатного месторождения в Карском море в 89-м рейсе (1-й этап) НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2022 г. (рис. 1а) [6]. Отбор донных осадков выполнен дночерпателем (ДЧ), мультикорером (МК) и трубкой большого диаметра (ТБД) на ст. 7441. Длина колонки из МК составила 28 см, из ТБД – 485 см.

Литологическое описание осадка проводилось по методике принятой в ИО РАН [7] с дополнениями [8]. Цвет осадка определяли с помощью каталога «Munsell soil color charts», 2012. Минералогические исследования выполнялись с помощью рентгенодифракционного анализа в сочетании с оптической микроскопией, сканирующей электронной микроскопией и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией.

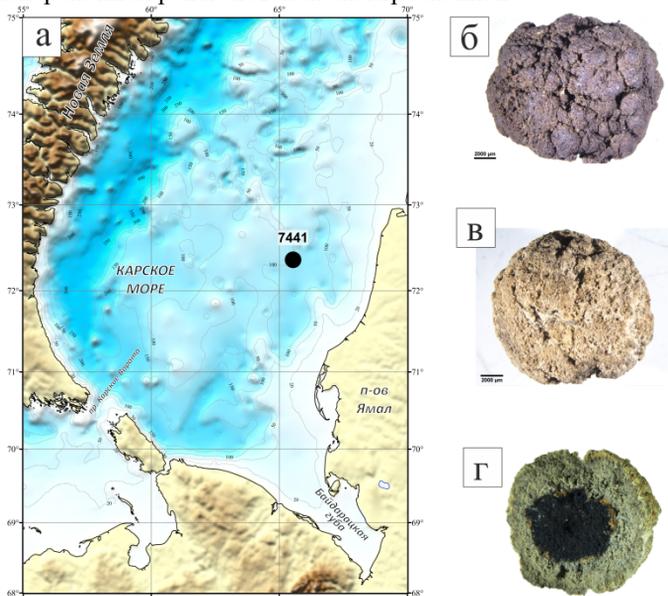


Рис. 1. а) Карта расположения станции отбора проб донных осадков; б) марганцевая конкреция из поверхностного слоя осадка, отобранного ДЧ; в) карбонатная конкреция из осадков, отобранных ТБД (интервал 48–49 см); г) поперечный срез карбонатной конкреции (интервал 48–49 см).

Осадки, отобранные ДЧ, представлены пелитом песчанистым темно-коричневого цвета с окисленным верхним слоем (0–5 см). Колонка осадков, полученная МК, представлена аналогичными пелитом песчанистым. Верхний окисленный слой 0–11 см слой осадков имеет темно-коричневый цвет; ниже залегает переходный слой темного серо-коричневого цвета. Верхняя часть (0–9 см) колонки, отобранной ТБД., представлена окисленным пелитом песчанистым темно-коричневого цвета, ниже которого (9–14 см) залегает переходный слой от окисленных к восстановленным осадкам. Подстилающая толща (14–451 см) – это восстановленные осадки, пелит алевритовый темно-серого цвета, в разной степени насыщенный включениями гидротроилита. Основание колонки (451–485 см) сложено чередующимися прослоями пелита алевритового и песка алевритового.

В верхней толще осадка вплоть до глубины 28 см обнаружены железомарганцевые конкреции (рис. 1б). Они имеют субсферическую форму, цвет – от темно-коричневого с розоватым оттенком до почти черного; размер – от 1 до 2 см в диаметре. Минеральный состав конкреций представлен, главным образом, бузеритом-I, 10\AA асболан-бузеритом и 7\AA бернесситом. На поверхности некоторых железомарганцевых конкреций наблюдается тонкая корочка (оболочка) охристого цвета, толщиной около 0.1 мм.

Карбонатные конкреции разных морфологических типов обнаружены в толще восстановленных осадков в интервале от 34 до 108 см.

В интервалах 34–35 и 48–49 см зафиксированы карбонатные конкреции субсферической формы от серого до светло-желтоватого и серо-коричневого цвета размером от 0.6 до 1.5 см. В центральной части конкреций выявлены ядра темно-бурого цвета, размером от 0.5 до 1.1 см, которые сложены 10\AA асболан-бузеритом (рис. 1в-г). Карбонатные оболочки толщиной 0.1 до 0.4 мм, состоят преимущественно из кутногорита и содержат примесь обломочных (кварц, плагиоклаз, амфибол) и глинистых (иллит, хлорит) минералов.

В интервале 89–90 см обнаружена карбонатная конкреция субсферической формы, серого цвета, не содержащая ядра, размером 0.7×0.6 см, сложенная кутногоритом с примесью обломочных (кварц, плагиоклаз) и глинистых (иллит, хлорит) минералов.

В интервалах 41–42 см и 106–108 см установлены карбонатные конкреционные образования в виде корок неправильной формы, размером от $1 \times 0.6 \times 0.5$ см до $2 \times 1.5 \times 1.3$ см. Минеральный состав корок представлен кутногоритом, а также обломочными (кварц, плагиоклаз) и глинистыми (смектит, иллит, хлорит) минералами в виде примеси.

Таким образом, в результате проведенных исследований в донных осадках Карского моря в районе Ленинградского газоконденсатного месторождения была обнаружена марганцевая минерализация, представленная несколькими типами конкреционных образований, такими

как железо-марганцевые конкреции, сложенные главным образом рудными марганцевыми минералами (бузеритом-I, 10\AA асболоан-бузеритом и 7\AA бернесситом); карбонатными кутногоритовыми конкрециями с ядром из 10\AA асболоан-бузерита или без ядра, а также кутногоритовыми корками. Как известно, кутногорит $\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg}, \text{Fe})(\text{CO}_3)_2$ – это богатый марганцем карбонатный минерал из группы доломита [2].

Нахождение в донных осадках железо-марганцевых конкреций и карбонатных (кутногоритовых) конкреций разных типов является, по мнению авторов, следствием активных диагенетических процессов.

Авторы выражают благодарность Ключиткину А.А. и Новигатскому А.Н. за организацию работ и помощь при отборе осадков, руководителю геологического отряда Новичковой Е.А., Матулю А.Г, Баранову Б.В. и всему геологическому отряду за помощь при отборе осадков, а также капитану Горбачу Ю.Н. и экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш».

Экспедиционные исследования выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» в рамках государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0020. Исследования в районах разгрузки метансодержащих флюидов выполнены за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-17-00334, <https://rscf.ru/project/25-17-00334/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. David S. Cronan. Manganese Nodules // Encyclopedia of Ocean Sciences (Third Edition). 2019. V. 5. P. 607–614.
2. Дара О.М., Леин А.Ю., Козина Н.В., Иванов М.В. Первая находка кутногорита в современных отложениях Южно-Каспийской котловины // Докл. РАН. 2015. Т. 465. № 5. С. 572–576.
3. Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Кравчишина М.Д. и др. Первая находка вивианита в донных отложениях Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 4. С. 653–661.
4. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Саввичев А.С. и др. Аутигенный Mg-кальцит на метановом полигоне в море Лаптевых // Океанология. 2017. Т. 57. №1. С. 194–213.
5. Рейхард Л.Е., Козина Н.В., Новигатский А.Н. и др. Процессы аутигенного минералообразования в Мировом океане: криогенез, галогенез, конкрециообразование, биоминерализация // Экзолит-2022. Литология осадочных комплексов Фанерозоя и Докембрия. Годичное собрание (научные чтения). Сб. науч. материалов. Секция осадочных пород МОИП, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии МГУ имени М.В. Ломоносова. М.: МАКС Пресс, 2022. С. 117–120.
6. Кравчишина М.Д., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н. и др. 89-й рейс

(1-й этап) НИС «Академик Мстислав Келдыш»: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией ТУ-134 «Оптик» в Карском море // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 492–495.

7. Безруков П.Л., Лисицын А.П. Классификация осадков современных морских водоемов // Геологические исследования в дальневосточных морях. Тр. Ин-та океанологии. Т. XXXII. М.: АН СССР, 1960. С. 3–14.

8. Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1993. 432 с.

Iron-manganese and carbonate nodules of various morphological types have been discovered in the bottom sediments of the Kara Sea in the area of the Leningradskoye gas condensate field. Lithological-mineralogical studies were conducted on nodules collected from a sediment core. The analysis established that the iron-manganese nodules are primarily composed of buserite I, birnessite, and other 10Å manganese hydroxides. The carbonate nodules were found to have a high content of kutnohorite.

Кособокова К.Н.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

xcosobokova@ocean.ru)

Резиденты и экспатрианты в планктоне Арктического Бассейна: распространение, роль в структуре сообществ и продуктивности

Kosobokova K.N.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Residents and expatriates in the plankton of the Arctic Basin: distribution, role in community structure and contribution to productivity

Ключевые слова: зоопланктон, Арктический бассейн, виды-резиденты, виды-экспатрианты, структура популяций, продуктивность

Работа посвящена систематизация данных, необходимых для оценки зоогеографического и экологического статуса представителей зоопланктона Северного Ледовитого океана, выявлению среди них независимых видов-резидентов и аллохтонных экспатриантов, оценке их численности и биомассы, исследованию их пространственного распределения по историческим и современным данным для изучения возможного изменения их роли в экосистеме на фоне происходящих климатических изменений.

Введение. Центральная глубоководная часть Северного Ледовитого океана – Арктический Бассейн (АБ) – является одним из самых экстремальных местообитаний морских организмов и одним из самых быстро меняющихся океанических районов на Земле. В последние два десятилетия Арктика переживает сильнейшее потепление за всю историю нашей планеты и беспрецедентную потерю морского льда. Усиление притока Атлантических и тихоокеанских вод и повышение их температуры вызывает изменение структуры вод АБ, сдвиги границ водных масс и изменения в распределении связанных с ними сообществ зоопланктона. До начала современных климатических изменений основу планктонных сообществ АБ составляли крупные и богатые липидами виды-резиденты, приспособленные к условиям арктической пелагиали. За счет местного размножения они поддерживали свою численность на уровне, обеспечивающем их стабильное воспроизводство. В последние годы, однако, появились свидетельства того, что наблюдающиеся климатические изменения могут привести к изменению равновесия между резидентами Арктики и более мелкими приносными видами (экспатриантами), поступающими в АБ из соседних акваторий, и до последнего времени не имевшими в Арктике независимых самостоятельных популяций.

Вытеснение обычных для Арктики планктонных видов-резидентов более

мелкими бореальными может иметь необратимые последствия для всей арктической экосистемы. Перестройка этого нижнего звена пищевой цепи может отразиться на более высоких трофических звеньях: рыбах, птицах и морских млекопитающих, и привести к серьезным перестройкам арктической морской экосистемы. Целью представленной работы явилась систематизация данных, необходимых для оценки зоогеографического и экологического статуса представителей зоопланктона Северного Ледовитого океана и выявление среди них видов-резидентов (ВР) и экспатриантов (ВЭ), оценка численности и биомассы массовых ВР и ВЭ, их пространственного распределения в Арктике по историческим и современным данным для изучения возможного изменения их роли в экосистеме на фоне происходящих климатических изменений.

Материалы и методы. В ходе работы был проведен анализ данных, позволяющих оценить зоогеографический и экологический статус представителей зоопланктона Северного Ледовитого океана для выявления среди них видов-резидентов (ВР) и экспатриантов (ВЭ). Были проанализированы данные о видовом составе, численности, возрастном/размерном составе и биомассе представителей зоопланктона по материалам, полученным в АБ в 1990-х гг. и 2000-х гг. В работе использовались результаты обработки планктонных проб из 4-х экспедиций научно-исследовательского ледокола “*Polarstern*”: ARK IX/4 (1993 г.), ARK XI/1 (1995 г.), ARK XXVI/3 (2011 г.), PS101 (2016 г.) и ледокола морской береговой охраны США “*Healy*”: OE-05 (2005 г.). Использованные пробы зоопланктона были собраны замыкающимися сетями Multinet Midi и Maxi (ячейка 150 мкм) путем послонного облова всей водной толщи по стандартным горизонтам от дна до поверхности.

Для отнесения видов к категориям ВР или ВЭ проводился анализ возрастного (в случае копепод) или размерного (в случае амфипод, шетинкочелюстных и желетельх) состава их популяций, а также закономерностей их количественного распределения в акватории Арктического бассейна. Отнесение таксона к резидентной фауне основывалось на двух критериях: 1) наличия и продолжительности присутствия в популяциях молоди вида и 2) широте встречаемости вида в пределах акватории АБ. К видам-экспатриантам относили виды, представленные в АБ не всеми стадиями развития, и виды, которые отсутствовали на части акватории (например, в глубоководных бассейнах).

Результаты и обсуждение. В планктонной фауне АБ представлены виды разного зоогеографического происхождения: эндемики (виды, встречающиеся только в АБ) и более широко распространенные океанические виды, в том числе, общие с Северной Атлантикой, Северной Пацификой, циркумполярные, биполярные виды и виды-космополиты.

Разделение этих видов на категории ВР или ВЭ показало, что ВР составляют около 85% фауны, причем среди резидентов есть представители

всех перечисленных выше зоогеографических категорий. К фауне экспатриантов относится около 15% видов, среди которых выделяются океанические и неритические (шельфовые) экспатрианты. К первому типу относятся океанические виды, попадающие в Арктику из Северной Атлантики и Северной Пацифики через связывающие эти океаны проливы – пролив Фрама и Берингов пролив. Шельфовые экспатрианты проникают в АБ с поверхностными водами из краевых арктических морей и практически не распространяются севернее области над континентальным склоном. Молодь в популяциях ни океанических, ни шельфовых экспатриантов в глубоководных бассейнах АБ не встречается, что подтверждает их стерильную экспатриацию в этих районах [1, 2].

В количественном отношении доминирующую роль среди видов-резидентов и в 1990-х, и в 2000-х гг. играли относительно крупные арктические рачки-резиденты копеподы *Calanus glacialis*, *C. hyperboreus*, *Metridia longa*, *Paraeuchaeta glacialis*, преобладавшие в планктоне по биомассе, а также более мелкие рачки *Oithona similis*, *Oncaea borealis*, *Microcalanus pygmaeus*, преобладавшие по численности. Рачки р. *Calanus* доминируют в планктоне АБ почти повсеместно, как в центральных районах, так и на его периферии, составляя >80% суммарной биомассы зоопланктона и основу местной вторичной продукции. Так, вклад *Calanus glacialis* в суммарную биомассу зоопланктона в Арктическом Бассейне колеблется от 10 до 60%, а *C. hyperboreus* от 20 до 70%.

Помимо перечисленных копепод, к числу ВР принадлежат и многие представители других таксономических групп: прочие ракообразные (бокоплавы, остракоды, декаподы), щетинкочелюстные и желетелые (медузы, гребневики и аппендикулярии), составляющие в арктических планктонных экосистемах основную массу хищного и всеядного зоопланктона.

Широта распространения океанических экспатриантов, имеющих центры ареалов в бореальных областях за пределами Арктики, или даже более широкое распространение, определяется их толерантностью к условиям АБ, возрастом, на котором они в него попадают, продолжительностью их жизни и особенностями циркуляции водных масс. Большинство океанических ВЭ в 1990-е гг. не были способны адаптироваться к условиям АБ. Часть видов погибала почти сразу после попадания в арктический регион (*Rhincalanus nasutus*, *Pleuromamma robusta*, *Metridia lucens*), другие распространялись на более широкие акватории (*Paraeuchaeta norvegica*, *Oithona atlantica*, *Meganctiphanes norvegica*, *Neocalanus cristatus*, *Eucalanus bungii bungii*, *Metridia pacifica*).

Характерно, что по мере дрейфа ВЭ с атлантическими и тихоокеанскими водами и удаления от источника (акватории) их происхождения, их обилие постепенно снижается за счет естественной смертности и выедания хищниками, что, в конечном счете, приводит к полному их исчезновению.

По этой причине их распространение в АБ обычно ограничено достаточно небольшими акваториями.

Исключением из этого правила является атлантический экспатриант копепода *Calanus finmarchicus*, распространение которого в АБ довольно широко и связано с распространением атлантических вод [3, 4]. В районах, ближайших к району «входных ворот» Арктики (пролив Фрама, желоб Св. Анны), он дает большой вклад в биомассу, который может составлять до 60% суммарной биомассы зоопланктона. Постоянный приток этого вида дает существенный вклад в трофодинамические процессы в пелагиали и поставку органического вещества на дно, обеспечивая важный источник пищи и энергии для бентосных организмов в районах его обилия. Примечательно, что хотя *C. finmarchicus* наиболее широко распространен в АБ среди остальных атлантических экспатриантов, он практически не встречается в Канадском Бассейне [3, 4].

Вклад тихоокеанских океанических экспатриантов в численность и биомассу зоопланктона в глубоководном Амеразийском бассейне невелик и несравним с численностью и биомассой *C. finmarchicus* в Евразийском. Большинство особей тихоокеанских океанических видов погибает во время транзита через мелководный шельф Чукотского моря [3, 5] из-за разницы в температурном режиме и глубинах. Хотя неритический тихоокеанский планктон представляет собой существенный компонент аллохтонной биомассы в Чукотском море, он не выдерживает разницы температур между Беринговым и Чукотским морем. Большинство тихоокеанских неритических видов погибает в пределах чукотского шельфа, становясь источником пищи для других организмов в толще вод (планктонных хищников или нектона), или осаждаясь на дно и становясь источником органики для донного населения [6, 7].

Таким образом, виды-экспатрианты в АБ представляют собой аллохтонный компонент зоопланктона [3], доля которого в отдельных районах может быть весьма заметной, но существенно различается между Евразийским и Амеразийским бассейнами [3, 4]. Приток неритических экспатриантов в океаническую часть АБ, в отличие от океанических, невелик, и несущественно влияет на объем аллохтонной биомассы.

Заключение. Планктонные виды-экспатрианты, несмотря на их невысокую долю в фаунистическом составе зоопланктона Арктики, представляют собой важный аллохтонный компонент зоопланктона, играющий в отдельных районах Арктического Бассейна существенную роль в биомассе и продуктивности его морских экосистем. Распространение экспатриантов определяется особенностями циркуляции атлантических, тихоокеанских вод и вод краевых арктических морей, а широта их распространения зависит от их толерантности к абиотическим условиям в АБ, продолжительности их жизни и системы господствующих течений. Различный вклад видов-экспатриантов в биомассу зоопланктона в

Евразийском и Амеразийском бассейнах определяет различную продуктивность этих бассейнов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-17-00121) в рамках темы Госзадания ИОРАН № FMWE-2024-0021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ekman S. Zoogeography of the Sea // Fox H.M. (ed.). London: Sidgwick and Jackson Limited, 1953. 417 p.
2. Беклемишев К.В. Экология и биогеография пелагиали. М.: Наука, 1969. 291 с.
3. Кособокова К.Н. Зоопланктон Арктического бассейна: структура сообществ, экология, закономерности пространственного распределения. М.: ГЕОС, 2012. 272 с.
4. Wassmann P., Carmack E., Kosobokova K.N. et al. The contiguous domains of Arctic Ocean advection: trails of life and death // *Progress in Oceanography*. 2015. V. 139. P. 42–65. doi: 10.1016/j.pcean.2015.06.011
5. Nelson R.J., Ashjian C., Bluhm B. et al. Biodiversity and Biogeography of the Lower Trophic Taxa of the Pacific Arctic Region – Sensitivities to Climate Change // *The Pacific Arctic Region: Ecosystem status and trends in a rapidly changing environment* / J. Grebmeier and W. Maslowski (Eds.). New York, NY: Springer, 2014. 384 p.
6. Ershova E.A., Hopcroft R.R., Kosobokova K.N. Interannual variability of summer mesozooplankton communities of the western Chukchi Sea: 2004–2012 // *Polar Biology*. 2015. V. 38. P. 1461–1481.
7. Ershova E.A., Questel J.M., Kosobokova K., Hopcroft R.R. Population structure and production of four sibling species of *Pseudocalanus* spp. in the Chukchi Sea // *Journal of Plankton Research*. 2017. V. 39. P. 48–64. doi: 10.1093/plankt/fbw078.

The work aims to identify resident and allochthonous expatriate species in the zooplankton communities of the Arctic Ocean, assess their abundance and biomass, and study their spatial distribution using historical and current data. The goal is to understand possible changes in these organisms' roles in the ecosystem in response to ongoing climate change.

Кособокова К.Н., Залота А.К.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: xkosobokova@ocean.ru)

**Размерная структура популяции каляноидного копеподы
Calanus glacialis в Белом море**

Kosobokova K.N., Zalota A.K.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

**Size structure of the White Sea population of calanoid copepod
*Calanus glacialis***

Ключевые слова: зоопланктон, Белое море, доминирующие виды, *Calanus*, размерная структура популяций

Работа посвящена изучению размерной структуры популяции арктической каляноидной копеподы *Calanus glacialis* на ее изолированной беломорской популяции с целью определения возможностей использования размеров тела для правильной идентификации этого вида в районах его смешения с близкими морфологически видами р. *Calanus*.

Введение. Копеподы р. *Calanus* являются массовыми в планктонных экосистемах арктических морей и центрального Арктического бассейна (АБ). Они доминируют в них по биомассе и являются основным передаточным звеном между первичными продуцентами и более высокими трофическими уровнями морской пищевой цепи. В водах АБ встречается 3 вида рода *Calanus*, которые очень близки морфологически. Один из них, *C. hyperboreus*, хорошо отличается от двух других, *C. glacialis* и *C. finmarchicus*, по своим крупным размерам, а видовое определение двух последних видов на основании морфологических критериев сильно затруднено. Вместе с тем, различать эти виды необходимо для правильной расшифровки их жизненных циклов, использования их в качестве биоиндикаторов арктических и атлантических вод, для правильной оценки продуктивности сообществ и вклада этих доминирующих компонентов зоопланктона в биоседиментацию.

Исторически видовые определения *C. glacialis* и *C. finmarchicus* при рутинной обработке проб основывались, главным образом, на использовании размерного критерия [1–4]. Однако в последние годы неоднократно было показано, что размерные диапазоны этих рачков варьируют в довольно широких пределах и могут частично перекрываться, приводя к ошибкам в определении в 10–20%. Избежать ошибок помогают методы молекулярной генетики, однако рутинное применение их на практике не всегда возможно из-за дороговизны и технических сложностей. Кроме того, большинство проб зоопланктона при отборе фиксируется формалином, что существенно затрудняет их исследование в дальнейшем

молекулярными методами. Поэтому при обработке большого количества проб размерный критерий остается пока единственным из наиболее доступных методов разделения этих двух экологически важных и массовых в арктических водах видов р. *Calanus*.

Понятно, что для корректного применения размерного критерия необходимо иметь представление не только о средних размерах той или иной стадии развития каждого из видов, но и знать пределы их естественной вариабельности. Правильным подходом было бы изучение размерных характеристик каждого из видов в отдельности, однако во многих районах северных широт получить такие сведения оказывается невозможно, поскольку популяции *C. glacialis* и *C. finmarchicus* в них смешиваются. Надежно разделить виды, особенно на ранних стадиях, при микрокопировании оказывается попросту невозможно.

Вместе с тем известно, что беломорская популяция *C. glacialis* изолирована от остальной части его ареала и от районов, где он встречается совместно с наиболее близким к нему морфологически *C. finmarchicus*. По этой причине она представляет собой идеальный модельный объект для изучения как естественной вариабельности размеров всех стадий развития, так и исследования возможных сезонных изменений размеров долгоживущих стадий. Поэтому, чтобы получить надежные размерные характеристики *C. glacialis*, нами было проведено изучение размерной структуры его беломорской популяции, причем размерные характеристики исследовались для всех стадий развития и в разные месяцы в течение почти двухлетнего цикла.

Материалы и методы. Материал собирали в проливе Великая Салма Кандалакшского залива Белого моря с мая по ноябрь 2023 г., с января по сентябрь 2024 г., а также в январе, марте и мае 2025 г. Зоопланктон отбирали на станциях с глубиной 220–290 м у о. Величаиха и станции с глубиной 80 м у о. Крестовый. Пробы фиксировали 4% формалином. Из проб отбирали до 200 рачков каждой копеподитной стадии, и с помощью бинокулярного микроскопа Leica DFC420 с использованием программы Leica Application Suite V.4.6. каждую особь фотографировали и измеряли длину ее цефалоторакса.

Для анализа размерной структуры использовался анализ разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы произведенный при помощи пакета программного обеспечения PAST [5]. Для выявления наиболее пригодной модели были использованы показатели критерия Акаике [6] и параметр логарифмического правдоподобия (log likelihood). Анализ был повторен 50 раз для получения стабильного результата.

Результаты и обсуждение. Младшие копеподиты I–III *C. glacialis* развиваются в Белом море весной – в начале лета относительно быстро. Их переход с одной стадии на другую происходит за 7–10 дней при типичных

для этого периода температурах ниже 15°C. Эти младшие стадии присутствуют в планктоне не более 1–1.5 месяцев (конец мая – начало июля), поэтому сезонных изменений их размеров не следовало ожидать. Наши результаты показали, что у I-II копепоидитных стадий диапазон длины тела (цефалоторакса) невелик, кривые изменения длины одновершинны. Старшие копепоидиты IV-V развиваются дольше и присутствуют в планктоне в течение более продолжительного периода (от месяца до нескольких месяцев), развиваясь при сезонно изменяющихся температурах. Чем старше стадия, тем больше разброс (диапазон) размеров (рисунок).

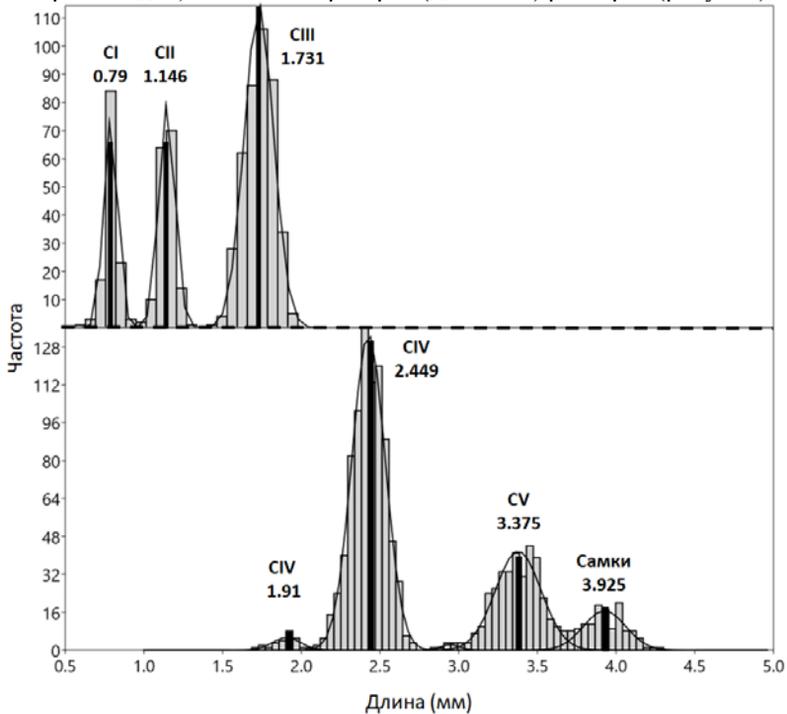


Рисунок. Гистограммы разделения смешанного распределения на нормально распределенные группы для размерного состава (длина цефалоторакса, мм) CI-CVI копепоидитных стадий *C. glacialis*. Жирной линией показаны средние размерных групп.

Мы предположили, что на IV-V копепоидитных стадиях могут наблюдаться сезонные различия размеров тела, связанные с разными температурными условиями в период их развития, а также с накоплением липидов. Результаты показали, однако, что достоверных различий в размерах между IV стадией новой генерации (особи, появляющиеся в июле-августе и представленные в сентябре, октябре и ноябре) и перезимовавшими

IV копеподами (особи с марта по конец июня следующего года) не наблюдается.

Интересным результатом является присутствие двух достоверно различающихся когорт IV стадии во второй декаде июня 2023 г.: особей с характерными для этой стадии размерами, и «мелких» особей (около 18% гемипопуляции IV стадии).

Результаты работы позволили на обширном сезонном материале охарактеризовать размерный спектр каждой копеподитной стадии развития беломорского *C. glacialis*, включая редко встречающихся самцов. Наши данные показывают, что хотя средние размеры каждой стадии хорошо совпадают с известными из литературы для Белого моря и других арктических районов, минимальные и максимальные размеры каждой стадии могут существенно выходить за известные из литературы рамки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект № 23-17-00121) и в рамках темы Госзадания ИОРАН № FMWE-2024-0021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hirche H.J., Hagen W., Mumm N., Richter C. The Northeast Water Polynya, Greenland Sea. III. Meso- and macrozooplankton distribution and production of dominant herbivorous copepods during summer // *Polar Biol.* 1994. V. 14. P. 491–503.
2. Кособокова К.Н. Зоопланктон Арктического бассейна: структура сообществ, экология, закономерности пространственного распределения. М.: ГЕОС, 2012. 272 с.
3. Kwasniewski S., Hop H., Falk-Petersen S., Pedersen G. Distribution of Calanus Species in Kongsfjorden, a Glacial Fjord in Svalbard // *Journal of Plankton Research.* 2003. V. 25. P. 1–20.
4. Trudnowska E., Ali Bukhari A., Gluchowska M. et al. From Pixels to Patterns: Trait Plasticity and Species Overlap of Calanus spp. // *Arctic Fjords. Ecology and Evolution.* 2025. V. 15. e71366. <https://doi.org/10.1002/ece3.71366>
5. Akaike H. A new look at the statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control.* 1974. V. 19. P. 716–723.
6. Hammer Ø. PAST: PAleontological STudies Version 3.0: Reference Manuel. Natural History Museum, Oslo, 2013. [website] URL: <http://folk.uio.no/ohammer/past/past3manual.pdf> (accessed: 03.10.2016).

The size structure of the population of the arctic calanoid copepod, *Calanus glacialis*, is studied in its isolated population in the White Sea in order to determine the potential use of body size for accurate identification of this species in areas where it mixes with morphologically similar species of *Calanus* genus.

**Крылов А.А.^{1,2,3}, Каминский Д.В.¹, Пилицын А.Г.⁴,
Покровский Б.Г.⁵, Чамов Н.П.⁵, Татаринов В.Ю.⁴,
Рогова И.В.¹, Семенов П.Б.¹, Аксенов А.О.^{2,6}, Гусев Е.А.¹,
Киль А.О.¹, Лодочникова А.С.¹, Шатрова Е.В.^{1,2},
Хлыстов О.М.³, Ахманов Г.Г.⁷**

(¹ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, e-mail: a.krylov@vniio.ru;
²СПбГУ, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург; ³ФГБУН «ЛИН СО РАН»,
Иркутск; ⁴ФГБУ «ИМГРЭ», Москва; ⁵ФГБУН «ГИН РАН», Москва; ⁶ФГБУ
«Институт Карпинского», Санкт-Петербург; ⁷МГУ, геологический факультет,
Москва)

Фокусированная разгрузка углеводородных флюидов в области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых

**Krylov A.A.^{1,2,3}, Kaminsky D.V.¹, Pilitsyn A.G.⁴,
Pokrovsky B.G.⁵, Chamov N.P.⁵, Tatarinov V.Yu.⁴,
Rogova I.V.¹, Semenov P.B.¹, Aksenov A.O.^{2,6}, Gusev E.A.¹,
Kil A.O.¹, Lodochnikova A.S.¹, Shatrova E.V.^{1,2},
Khlystov O.M.³, Akhmanov G.⁷**

(¹VNIIOkeangeologia, St.Petersburg; ²SPbSU, Institute of Earth Science, St.Petersburg;
³LIN SB RAS, Irkutsk; ⁴IMGRE, Moscow; ⁵GIN RAS; ⁶Karpinsky Institute,
St.Petersburg; ⁷MSU, Moscow)

Focusing discharge of hydrocarbon fluids at the area of connection the Gakkel Ridge with the Laptev Sea shelf

Ключевые слова: хребет Гаккеля, аутигенные карбонаты, метан, грязевой вулкан, кутнагорит

В экспедиции Арктика-2024 изучался район сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых. По результатам съемки многолучевым эхолотом были обнаружены структуры, связанные с фокусированной разгрузкой углеводородных флюидов. Изучение одной из структур позволило отнести ее к грязевому вулкану, на поверхности которого обнаружены бактериальные маты и аутигенные карбонаты, представленные кутнагоритом. Изучение молекулярного и изотопного состава газов, отобранных из донных осадков, показало их катагенетическую природу.

В августе–сентябре 2024 г. в Северном Ледовитом океане была проведена геолого-геофизическая экспедиция «Арктика–2024» на борту ОИС «Янтарь» [2]. Исследования выполнялись в одном из наименее изученных сегментов хребта – области его сочленения с шельфом моря Лаптевых. Главной особенностью региона является широкое развитие оползневых процессов и, как следствие, большие мощности осадков, перекрывающих рифтовую долину [3]. Результаты многолучевого

эхолотирования позволили провести детальный анализ рельефа дна [1] и обнаружить многочисленные зоны фокусированной разгрузки углеводородных флюидов, представленных покмарками и структурами, похожими на грязевые вулканы и глиняные диапирсы.

Одна из открытых в экспедиции структур была выбрана для детального обследования с использованием телеуправляемого необитаемого подводного комплекса (ТНПК), оснащенного манипулятором для отбора образцов; донные осадки из данной структуры были подняты с помощью прямоточной гравитационной трубки (вес 600 кг, длина 4.5 м).

Структура представляет собой сдвоенное поднятие, основание которого находится на глубинах около 1980–1985 м. Один из холмов более крупный, с размерами около 1350–1400 м, второй заметно меньше – 950–990 м. Общая продольная длина сдвоенной структуры составляет около 2340 м. «Маленькое» поднятие имеет максимальную высоту немногим более 120 м, «большое» – около 115 м, с максимальной высотой около 120 м по вершинам стенки кратера; поднятия разделены седловиной глубиной около 50 м. «Маленькое» поднятие относительно изометричное, тогда как в большом можно выделить кратерообразную депрессию в вершинной части и предположить наличие слабовыраженного конуса выноса грязевого материала. Следует отметить, что описанная структура имеет морфологическое сходство с грязевыми вулканами и глиняными диапирсами [5]. «Сдвоенные» грязевые вулканы с похожим строением встречаются на озере Байкал; наиболее ярким примером является грязевой вулкан Кедр, основание которого находится в диапазоне глубин ~790–750 м, а вершинная часть на глубине около 570 м [4]; таким образом, структура Кедр является более мелководной и более высокой (около 180–220 м над уровнем дна), по сравнению с открытой нами структурой на хребте Гаккеля.

С помощью видеофиксации на склоне изученной структуры в прилаптевоморской части хребта Гаккеля и в кратере на ее вершине зафиксированы многочисленные бактериальные маты и участки выходов на поверхность черных восстановленных илов. Кроме того, на поверхности склона обнаружены аутигенные карбонатные образования сложной изогнутой рогоподобной формы, размером до 30x15 см. Изотопный состав карбонатов ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$) свидетельствует об участии в их формировании углерода окисляемых катагенетического метана и органического вещества. Сами карбонаты сложены кутнагоритом, с примесью обломочных минералов, захваченных в процессе кристаллизации (кварц, полевой шпат, слюда, глинистые минералы). Необычный облик карбонатов свидетельствует об их росте внутри каналов, по которым происходило движение газонасыщенных флюидов.

Разрез поднятой на борт судна колонки содержал восстановленный газонасыщенный осадок с сильным запахом сероводорода, причем в разрезе осадков обнаружена конкреция аутигенного карбоната размером 1x3 см.

Анализ химического состава поровых вод показал, что сульфат-ион исчезает на уровне 50 см, а его распределение по разрезу противоположно распределению содержания метана, что является следствием процесса анаэробного окисления метана.

В молекулярном составе газов в разрезе осадков были обнаружены метан и его гомологи вплоть до нормального пентана, изо-пентана и неопентана. Изотопный состав углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$) в совокупности с присутствием тяжелых гомологов однозначно свидетельствует о катагенетической (термогенной) природе углеводородных газов. Аналогичный молекулярный и изотопный состав газов был зафиксирован и в пределах грязевого вулкана Кедр на озере Байкал [4].

Приведенные факты свидетельствуют в пользу того, что изученная структура представляет собой зону фокусированной разгрузки углеводородных флюидов и может являться грязевым вулканом. Известно, что такого рода структуры часто соответствуют зонам разломов или антиклинальным структурам, и располагаются в районах общей тектонической компрессии. Грязевые вулканы и глиняные диапиры часто формируются в областях с высокими скоростями осадконакопления, например, в районах развития оползней, а триггерами начала миграции газов могут являться землетрясения [5]. Нами установлено, что оползни имеют широкое распространение в области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых; также известна высокая сейсмичность этого региона. Следует отметить, что в районе нахождения указанной грязевулканически-подобной структуры обнаружена субмеридионально ориентированная цепочка поднятий округлой формы, вероятно, трассирующая зону разломов земной коры в пределах западного борта рифтовой долины прилаптевоморского сегмента хребта Гаккеля.

Данные многолучевого эхолотирования в пределах работ экспедиций Арктика-2022 и Арктика-2024 позволили обнаружить десятки структур типа грязевых вулканов/глиняных диапиров, а также – покмарков. Таким образом, область сочленения хребта Гаккеля с Лаптевоморским шельфом может рассматриваться в качестве крупной провинции, включающей разнообразные структуры фокусированной разгрузки углеводородных флюидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зинченко А.Г., Егоров С.В., Фирсов Ю.Г. и др. Новые данные о рельефе прилаптевоморского сектора континентального склона Евразийского бассейна (по результатам батиметрических съемок 2022 и 2024 гг.) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 146–157. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-146-157
2. Каминский Д.В., Крылов А.А., Татаринов В.Ю. и др. Первые результаты исследований области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря

Лаптевых в экспедиции Арктика-2024 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Вып. 11. С. 166–175. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-166-175

3. Рекант П.В., Петров О.В., Гусев Е.А. Модель формирования седиментационной системы Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана как основа для реконструкции его тектонической истории // Геотектоника. 2021. № 5. С. 27–50. doi:10.31857/S0016853X21050064

4. Nachikubo A., Minami H., Yamashita S. et al. Characteristics of hydrate-bound gas retrieved at the Kedr mud volcano (southern Lake Baikal) // Sci Reports. 2020. V. 10. P. 1–12.

5. Mazzini A., Etiope G. Mud volcanism: An updated review // Earth-Science Reviews. 2017. V. 168. P. 81–112. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.03.001

During Arktika-2024 expedition the area of the Gakkel Ridge connection with the Laptev Sea shelf was studied. Based on multibeam survey the structures related to focusing discharge of hydrocarbon fluids were discovered. One structure was investigated in details and attributed to mud volcano. The surface sediments of this structure were often covered with bacterial mats and contain authigenic carbonate (kutnohorite). Based on study of isotopic and molecular composition of gas selected from sediments its thermogenic nature was established.

Лейченко Г.Л.¹, Гусева Ю.Б.², Сергеева В.М.¹

(¹Всероссийский НИИ Геологии и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга, г. Санкт-Петербург, e-mail: german_l@mail.ru; ²Полярная морская геологоразведочная экспедиция, г. Санкт-Петербург)

Тектоническое строение и эволюция земной коры антарктического сектора Тихого океана

Leitchenkov G.L.¹, Guseva Ju.B.², Sergeeva V.M.¹

(¹Research Institute for Geology and mineral resources of the World Ocean, St.-Peterburg (VNIIOKeangeologia); ²Polar Marine Geosurvey Expedition, St.-Petersburg)

Tectonic Structure and crustal evolution of the southernmost Pacific Ocean, Antarctica

Ключевые слова: тихий океан, литосферная плита, океанический спрединг, субдукция.

Исследование основано на геолого-геофизических данных, полученных в антарктическом секторе Тихого океана российскими и зарубежными экспедициями. Составлена схема тектонического строения и установлена эволюция земной коры этого региона на протяжении 100 млн. лет.

Антарктический сектор (южная часть) Тихого океана расположен к югу от 60° ю.ш. между 60° з.д. и 150° в.д. Настоящее исследование основано на геолого-геофизических данных, полученных ВНИИОкеангеология и Полярной морской геологоразведочной экспедицией (ПМГРЭ) в рейсах НИС «Академик Александр Карпинский», в 2019 и 2024 гг., и зарубежными экспедициями (Великобритании, Германии, США, Японии). В результате обобщения, обработки и интерпретации всех имеющихся материалов составлена схема тектонического строения этого региона с выделенными тектоническими провинциями и структурными элементами (рисунок). Тектоническая схема является уточненной частью Тектонической карты Антарктики, изданной в международной Комиссии по геологической карте Мира в 2023 г. [1].

Океаническая кора антарктического сектора Тихого океана имеет широкий возрастной диапазон, от нижних ярусов верхнего мела до голоцена и осложняется протяженными трансформными разломами, имеющими местами сложную внутреннюю структуру, и внутриплитными вулканическими постройками (рисунок). Предыстория Тихого океана (Палеопацифики) началась с распада Родины – океанического раскрытия между Антарктидой и северной Америкой, и становления Гондваны в позднем протерозое – раннем палеозое. Эти и более поздние процессы отразились в складчатых поясах края Восточно-антарктической платформы (Росская орогения), Новой Зеландии и Западной Антарктиды (Андская орогения), формировавшихся в результате аккреции земной коры на

конвергентной границе плит (рисунок).

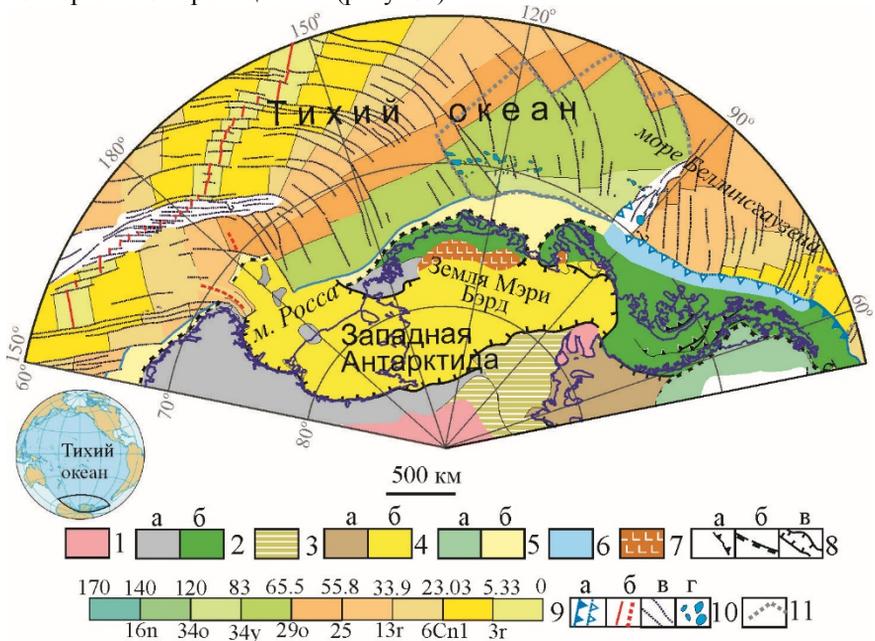


Рисунок. Тектоническое строение антарктического сектора Тихого океана: 1 – докембрийский фундамент Восточно-Антарктической платформы; 2 – орогены (а – позднепротерозойский-раннепалеозойский, Русский ороген; б – фанерозойский, Андский ороген); 3 – позднепротерозойская-палеозойская внутриплитная складчатая зона; 4 – внутриконтинентальные рифты (а – позднепалеозойский; б – позднемеловой-кайнозойский); 5 – окраинные рифты (а – юрско – раннемеловой; б – меловой); 6 – кайнозойский преддуговой бассейн; 7 – позднекайнозойская щелочная вулканическая провинция; 8 – континентальные структурные линеаменты (а – надвиги; б – внутренние границы окраинных рифтов; в – границы внутриконтинентальных рифтов); 9 – океаническая кора (над шкалой показан возраст в миллионах лет, под шкалой – хроны полярности магнитного поля); 10 – океанические структурные линеаменты (а – зоны субдукции и палеосубдукции; б – активные и отмершие срединно-океанические хребты; г – трансформные и палеотрансформные разломы; в – подводные горы); 11 – палеоплиты Белинсгаузен и Феникс.

К середине позднего мела большая часть Восточной Гондваны, включавшей Антарктиду, Австралию и Новую Зеландию с плато Кэмпбелл и поднятием Чатэм (в настоящее время погруженные континентальные блоки Земной коры), оставалась единым, достаточной крупным

палеоконтинентом [2]. Время начала рифтогенных процессов, которые в дальнейшем привели к отделению новозеландских блоков, точно не известно. Предполагается, что активная фаза рифтогенеза началась после субдукции хребта между Тихоокеанской плитой и плитой Феникс к северу от Новой Зеландии около 105 млн. лет назад и продолжалась около 15–25 млн. лет до раскола литосферы и спрединга морского дна между Антарктидой поднятием Чатэм и плато Кэмпбелл около 90–85 млн. лет назад [2]. В дальнейшем происходила пропация центра спрединга в западном направлении до 80–77 млн. лет.

Начиная с 84 млн. лет к востоку от разломной зоны (палеотрансформного разлома) Прото-Антиподес, расположенного примерно вдоль 130 з.д., существовала независимо передвигавшаяся плита Беллингаузен **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, создавшая широкую (около 650 км) зону деформаций коры вблизи континентальной окраины западной части Земли Мэри Бэрд [3]. Около 62 млн. лет назад (хрон полярности С27) плита Беллингаузена была интегрирована в состав Антарктической плиты. Ранний океанический спрединг в северной части моря Амундсена осложнился формированием подводной вулканической провинции Мэри Бэрд с возрастом 65–56 млн. лет.

Наиболее сложное тектоническое строение имеет восточная часть антарктического сектора Тихого океана в море Беллингаузена. Здесь выделены два разновозрастных спрединговых бассейна; первый из них, верхнемеловой, расположен к западу от 92°–95 з.д., а второй, палеогеновый, – к востоку от 90°–91° з.д. Верхнемеловой спрединговый бассейн является юго-восточным фрагментом палеоплиты Беллингаузен [3], развивавшейся независимо к югу от Тихоокеанско-Антарктического хребта в интервале 79–61 млн. лет назад и затем была захвачена Антарктической плитой). До этого, в системе палеоокеана короткое время, между 100 и 90 млн. лет назад, существовала микроплита Шарко, которая субдуцировалась и исчезла под Землей Мэри Бэрд и Землей Элсуэрта.

В южной части западного, верхнемелового, спредингового бассейна возраст и строение океанической коры достоверно не установлены. Возможно, здесь присутствует часть палеоплиты Шарко, захваченная плитой Беллингаузен около 90 млн. лет назад, когда произошло разделение Западной Антарктики и Новой Зеландии с ее погруженными блоками. Магматическая кора большей части спредингового бассейна формировалась в период суперхрона нормальной полярности геомагнитного поля (С34), поэтому в ее пределах отсутствуют линейные магнитные аномалии. Скорость полуспрединга в период между этими хронами полярности (84–79.5 млн. лет) составляет 3.7 см/год.

Восточный, палеогеновый, спрединговый бассейн, занимающий акваторию к востоку от 90°–91° з.д., сложен океанической корой раннепалеоценового-позднеолигоценового возраста (от ~62 млн. лет на

северо-западе до ~24 млн. лет на юго-востоке). Океаническая кора омолаживается здесь в сторону континента, до зоны палеосубдукции, где произошло поглощение плиты Феникс и отмирание активной окраины в среднем эоцене – плиоцене, последовательно с запада на восток от ~45 до ~3 млн. лет назад, за счет коллизии срединно-океанического хребта с желобом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grikurov G.E., Leitchenkov G. Tectonic Map of Antarctica (Scale 1:10 M) and Explanatory Notes. Commission for Geological Map of the World (CGMW). Paris, 2023.
2. Lawver L.A., Gahagan L.M., Coffin M.F. The development of paleoseaways around Antarctica // The role of the Southern Ocean and Antarctica in global change: An Ocean Drilling Perspective / ed. by J.P. Kennet, J. Barren. Antarctic Research Series, AGU, 1992. V. 56. P. 7–30.
3. Wobbe F., Gohl K. Chambord A., Sutherland A. Structure and breakup history of the rifted margin of West Antarctica in relation to Cretaceous separation from Zealandia and Bellingshausen plate motion // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2012. V. 13. Q04W12, doi:10.1029/2011GC003742

The study is based on geological and geophysical data acquired in the Antarctic sector of the Pacific Ocean by expeditions from many countries and organizations. Following the integration, processing and interpretation of these data, a tectonic sketch of the region has been compiled. This shows the tectonic provinces of West Antarctica, marginal and a deep-water basin with oceanic crust of various ages. The evolution of the Antarctic sector of the Pacific Ocean crust over the last 500 million years is presented.

**Маслов А.В.¹, Стародымова Д.П.², Мигдисова И.А.²,
Козина Н.В.², Новичкова Е.А.², Алексеева Т.Н.²,
Шевченко В.П.²**

(¹Геологический институт РАН, г. Москва, e-mail: amas2004@mail.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: d.smokie@gmail.com)

Y-PЗЭ систематика алевритово-пелитовых и пелитовых илов юго-запада Карского моря

**Maslov A.V.¹, Starodymova D.P.², Migdisova I.A.²,
Kozina N.V.², Novichkova E.A.², Alekseeva T.N.²,
Shevchenko V.P.²**

(¹Geological Institute RAS, Moscow; ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Y-REE systematics of silty-pelitic and pelitic sediments in the Southwestern Kara Sea

Ключевые слова: юго-западные районы Карского моря, пелитовые и алевритово-пелитовые поверхностные донные илы, редкоземельные элементы и Y

Рассмотрена систематика PЗЭ и Y поверхностных донных осадков, отобранных в 89-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в юго-западной части Карского моря. Сделан вывод, что Y-PЗЭ систематика пелитовых и алевритово-пелитовых илов названной акватории по ряду параметров не похожа на систематику лантаноидов и Y во взвеси и Оби и Енисея, а также различных референтных объектов.

В публикации [1] проанализированы литогеохимические характеристики пелитовых и алевритово-пелитовых илов ЮЗ части Карского моря (Байдарацкая губа, Пухучанская впадина, Западно-Карская ступень и Новоземельская впадина), отобранных в 89-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” (рис. 1а), а также кратко рассмотрена систематика редкоземельных элементов (PЗЭ) и Y в них. Показано, что в составе алевритово-пелитовых и пелитовых илов присутствует существенная доля литогенного компонента. Это хорошо согласуется с распределением фигуративных точек илов на различных дискриминантных диаграммах вблизи референтных точек палеозойских граувакк и РААС. Сделанные выводы не противоречат и результатам предшествующих, установивших поступление на юго-запад Карского моря определенной доли тонкой алюмосиликокластики (взвеси) Оби. Предполагается, что с учетом присутствия в верхнем слое донных осадков этого района незначительного количества обломков основных магматических пород [2], вклад продуктов их разрушения в состав осадков был в целом незначительным. Параметры спектров PЗЭ в илах согласуются с таким предположением.

В данной работе продолжен поиск критериев, позволяющих разграничить тонкую силикокластику из разных источников (взвесь Оби и

Енисея, осадочные и магматические породы, а также рыхлые образования Ямала, Вайгача, Югорского п-ова и Новой Земли), а Y-PЗЭ систематика илов исследована с помощью ряда дискриминантных диаграмм, широко применяемых при подобного рода работах [3 и др.]. Гранулометрический состав илов и содержание в них PЗЭ и Y определены в Институте океанологии им. П.П. Шишова РАН водно-механическим методом и методом ICP-MS.

Так как в составе окружающих ЮЗ часть Карского моря водосборов преобладают осадочные образования, сведения о содержании в которых PЗЭ и Y в литературе отсутствуют, мы условно считаем, что они по геохимическим характеристикам близки к РААС. При построении диаграмм использованы данные о содержании Y и PЗЭ в средних фанерозойских гранитах, мезо-кайнозойских базальтах и фельзитах, палеозойских андезитах (все по [4]). Кроме того, привлечены сведения по Y-PЗЭ систематике взвеси Оби и Енисея [5], так как считается, что по микроэлементному составу поверхностные донные осадки ЮЗ части Карского моря отвечают “обскому типу”, либо характеризуются одновременно и обскими и енисейскими признаками, при преобладании первых [6]. Нормирование содержания PЗЭ и Y при построении графиков и расчете Eu и Ce аномалий выполнено по среднему составу верхней части континентальной земной коры (UCC) [7].

Сопоставление суммы PЗЭ с содержанием в пробах песчаного, алевритового и пелитового компонента показывает, что только между последним и суммой PЗЭ наблюдается статистически значимая положительная корреляция (коэффициент корреляции, r , 0.69) (рис. 1б, в). Между содержанием в пробах песка и алеврита и суммой PЗЭ корреляция статистически незначимая отрицательная ($r = -0.65$ и -0.43). Таким образом, основным носителем PЗЭ в илах выступает пелитовая фракция.

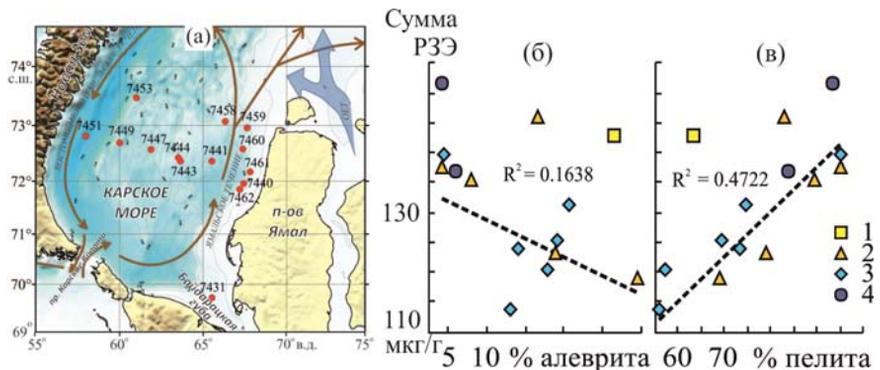


Рис. 1. Положение станций, на которых отобраны пробы (а) и корреляция суммы PЗЭ и содержания различных фракций осадков (б, в):

1 – Байдарацкая губа; 2 – Пухучанская впадина; 3 – Западно-Карская ступень; 4 – Новоземельская впадина. ОЕТ – Обь-Енисейское течение.

На диаграмме $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ большинство референтных объектов (за исключением PAAS) обладают заметно меньшими величинами $(La/Yb)_{UCC}$, чем пелитовые и алевроитово-пелитовые илы ЮЗ части Карского моря, тогда как значения $(Gd/Yb)_{UCC}$ в илах и в референтных объектах (за исключением илов Новоземельской впадины) сопоставимы (рис. 2а). Необходимо отметить, что области, образуемые фигуративными точками илов Пухучанской впадины, Западно-Карской ступени и Новоземельской впадины на данном графике практически не имеют перекрытия. Только точка илов Байдарацкой губы попадает в поле илов Пухучанской впадины. Ни к одной из перечисленных областей не принадлежит и точка PAAS.

На графике $(La/Lu)_{UCC}-(La/Y)_{UCC}$ подавляющее большинство референтных точек расположено достаточно далеко от областей фигуративных точек илов, прежде всего вследствие более низких значений $(La/Y)_{UCC}$ (рис. 2б). По величинам $(La/Lu)_{UCC}$ с поверхностными донными илами разных районов ЮЗ части Карского моря сопоставимы средние палеозойские граниты, а также взвесь Оби и Енисея. Палеозойские андезиты, мезо-кайнозойские фельзиты и базальты, напротив, имеют пониженные значения данного параметра, а PAAS – более высокое. Перекрытие областей точек илов Пухучанской впадины и Западно-Карской ступени здесь несколько больше, чем на графике $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$.

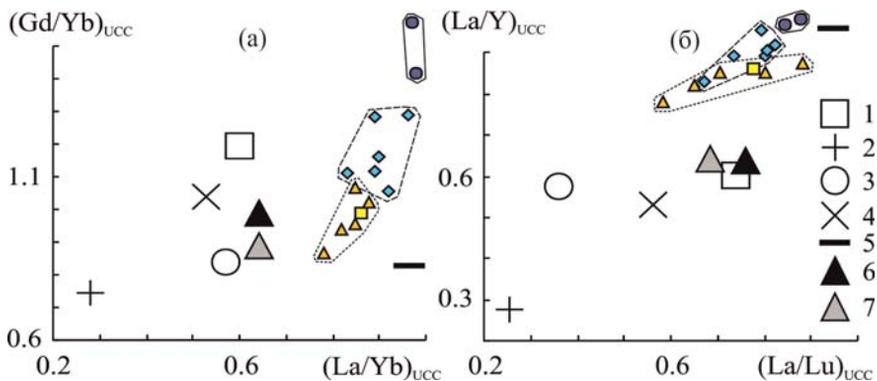


Рис. 2. Положение точек илов и ряда референтных объектов на диаграммах $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$ (а) и $(La/Lu)_{UCC}-(La/Y)_{UCC}$ (б):

1 – средние фанерозойские граниты; 2 – мезо-кайнозойские базальты; 3 – фельзиты того же возраста; 4 – палеозойские андезиты; 5 – PAAS; 6 – взвесь Оби; 7 – взвесь Енисея. Остальные условные обозначения см. рис. 1.

Распределение точек состава илов различных районов ЮЗ части

Карского моря и референтных объектов на диаграмме $(La/Yb)_{UCC}-Eu/Eu^*_{UCC}$ (рис. 3а) напоминает то, что мы уже видели на графике $(La/Yb)_{UCC}-(Gd/Yb)_{UCC}$. Илы обладают более высокими, чем все референтные объекты (за исключением PAAS), величинами $(La/Yb)_{UCC}$. Области точек илов Пухучанской впадины и Западно-Карской ступени обладают на данной диаграмме примерно 50%-м перекрытием. В этой же зоне перекрытия расположена и точка илов Байдарацкой губы. РЗЭ систематика илов Новоземельской впадины несколько отлична от систематики лантаноидов илов трех других районов ЮЗ части Карского моря, поэтому, как и на рассмотренных выше графиках, здесь эти илы образуют самостоятельную (без перекрытий) область. Интересно, что по значениям и $(La/Yb)_{UCC}$ и Eu/Eu^*_{UCC} илы Новоземельской впадины практически сопоставимы с PAAS.

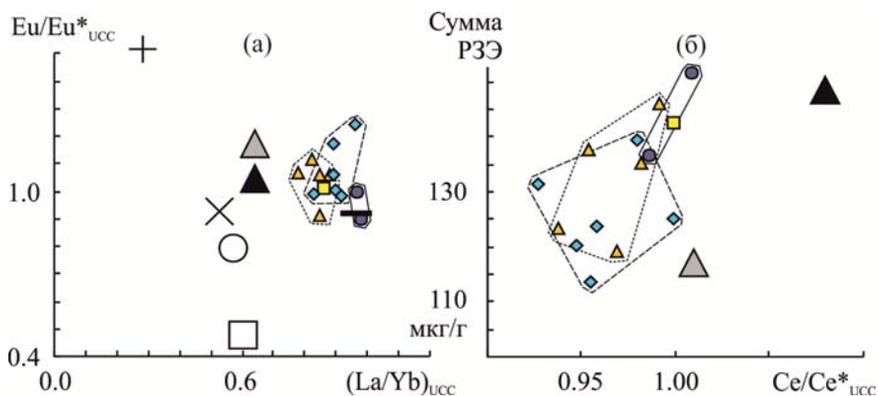


Рис. 3. Распределение фигуративных точек илов ЮЗ части Карского моря и ряда референтных объектов на диаграммах $(La/Yb)_{UCC}-Eu/Eu^*_{UCC}$ (а) и $Ce/Ce^*_{UCC}-Сумма РЗЭ$ (б). Условные обозначения см. рисунки 1 и 2.

На графике $Ce/Ce^*_{UCC}-Сумма РЗЭ$ также можно видеть, что РЗЭ систематика пелитовых и voto-пелитовых илов разных районов ЮЗ части Карского моря по названным параметрам заметно отличается от аналогичной систематики взвесей Оби и Енисея (рис. 3б). При этом точка взвеси Оби расположена дальше от областей точек разных районов ЮЗ части Карского моря, чем точка взвеси Енисея. Это, как и распределение точек состава илов и взвеси Оби и Енисея на других диаграммах, на наш взгляд, не совсем согласуется с представлениями о том, что состав редких и рассеянных элементов поверхностных донных осадков ЮЗ части Карского моря обладает «обской спецификой» или характеризуются и обским и енисейским распределением при ведущей роли первого. Перекрытие между областями илов Пухучанской впадины и Западно-Карской ступени здесь еще больше, чем на графике $(La/Yb)_{UCC}-Eu/Eu^*_{UCC}$, а точка илов Байдарацкой губы находится в области состава илов Новоземельской

впадины, тогда как на графиках в других координатах ее положение иное.

Все сказанное демонстрирует определенную специфику Y-P3Э систематики поверхностных донных илов ЮЗ части Карского моря и несводимость ее к систематике лантаноидов во взвеси и Оби и Енисея, а также различных референтных объектов. По ряду нормированных на UCC параметров исследованные илы близки к PAAS, но по ряду их заметно отличаются.

Авторы признательны М.Д. Кравчишиной, А.А. Клювиткину, А.В. Булохову и С.В. Сломнюку, а также экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш” за помощь в экспедиции.

Экспедиционные исследования проведены в соответствии с госзаданием ИО РАН (тема FMWE-2024-0020) и при финансовой поддержке Минобрнауки РФ. Изучение распределения микроэлементов в осадках поддержано грантом РНФ 20-17-00157-П. Интерпретация данных выполнена в рамках госзадания ГИН РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maslov A.V., Starodymova D.P., Migdisova I.A. et al. Litho-geochemistry of silty–pelitic bottom sediments in the southwestern Kara Sea // *Lithology and Mineral Resources*. 2025. V. 60. № 1. P. 25–42.
2. Лисицын А.П., Харин Г.С., Чернышева Е.А. Базальты в грубообломочном материале донных осадков Карского моря // *Океанология*. 2004. Т. 44. № 4. С. 589–599.
3. Xu Z., Lim D., Choi J. et al. Rare earth elements in bottom sediments of major rivers around the Yellow Sea: implications for sediment provenance // *Geo-Mar. Lett.* 2009. V. 29. P. 291–300.
4. Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // *Chem. Geol.* 1993. V. 104. P. 1–37.
5. Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 174 с.
6. Асадулин Э.Н., Мирошников А.Ю. Распределение разнородных терригенных донных осадков в западной части Карского моря по геохимическим признакам // *Вестник Моск. ун-та. Сер. 5: География*. 2016. № 3. С. 98–105.
7. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // *Treatise on Geochemistry*. V. 3: The crust. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.

The systematics of REE and Y of surface bottom sediments collected during the 89th cruise of the R/V “*Akademik Mstislav Keldysh*” in the southwestern part of the Kara Sea is considered. It is concluded that the Y-REE systematics of pelitic and silty-pelitic sediments of the named area is not similar in a number of parameters to the systematics of REE and Y in suspension of the Ob and Yenisei, as well as various reference objects.

**Мещеряков Н.И.¹, Усягина И.С.¹, Ананьев Р.А.²,
Сорохтин Н.О.², Иванова Н.С.¹, Кокин О.В.³**

(¹Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск e-mail: meshcheriakov104@mail.ru ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ³Геологический институт РАН, г. Москва)

Геохронологические исследования донных отложений пролива Вилькицкого в 56-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов»

**Meshcheriakov N.I.¹, Usyagina I.S.¹, Ananyev R.A.²,
Sorokhtin N.O.², Ivanova N.S.¹, Kokin O.V.³**

(¹Murmansk Marine Biological Institute RAS, Murmansk; ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³Geological Institute RAS, Moscow)

Geochronological studies of bottom sediments in the Vilkitsky Strait during the 56th cruise of the R/V «Akademik Nikolay Strakhov»

Ключевые слова: донные отложения, скорость седиментации, голоцен, шельф, Карское море.

В ходе 56-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в 2023 г. в проливе Вилькицкого проведены комплексные исследования голоценовых осадочных отложений. Работы включали сейсмопрофилирование для изучения строения осадочной толщи, отбор колонок донных отложений с целью гранулометрического анализа осадков, накопившихся после завершения малого ледникового периода (МЛП), а также радиоизотопное датирование (²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs) для определения их возраста и расчета скоростей седиментации. Проведенные исследования дополняют представления о седиментационных процессах в Арктике, демонстрируя высокую изменчивость скоростей осадконакопления в проливе Вилькицкого в голоцене.

В рамках 56 рейса НИС «Академик Страхов» в проливе Вилькицкого проводилось сейсмопрофилирование верхней осадочной толщи с последующим отбором керна донных отложений, сформированных после завершения малого ледникового периода [1]. Целью исследований являлось определение особенностей седиментации в условиях климатических изменений последних столетий и сопоставление полученных данных со значениями скоростей осадконакопления для голоцена, полученными в этом районе по результатам работ предыдущих лет. Отбор проб (станция ANS-56-10) проводился с глубины 129 м в районе точки PS2719, исследованной отечественными и зарубежными коллегами в зоне западного входа в пролив. Для отбора проб использовалась трубка ГОИН-1.5, что позволило получить керн мощностью 113 см с относительно не поврежденной стратиграфией. Первичная обработка материала выполнялась на борту судна, после чего образцы были заморожены и доставлены в лабораторию

океанографии и радиоэкологии ММБИ РАН для радиоизотопного датирования (^{210}Pb , ^{137}Cs) и гранулометрического анализа.

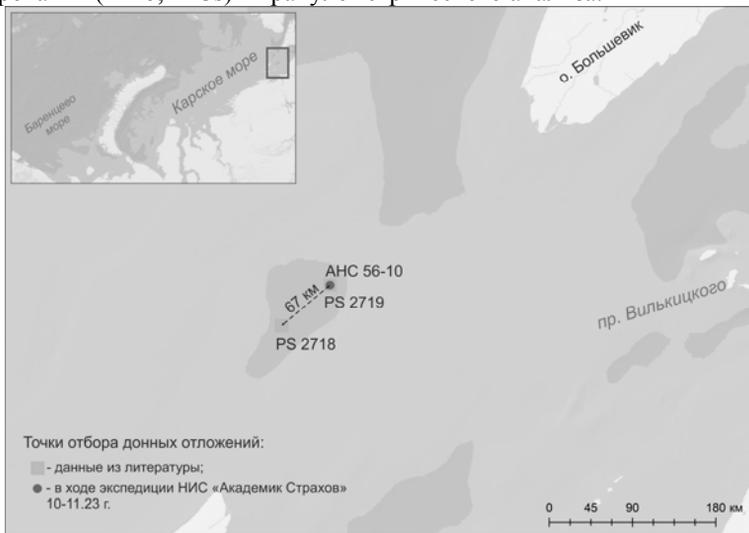


Рис. 1. Станции отбора проб в районе работ

Радиоизотопный анализ проводился послойно на многоканальном гамма-спектрометре Canberra (США) со свинцовой защитой детектора «Экран-2П» (Россия). Использовался германиевый детектор BE5030 с диапазоном регистрации 3 кэВ–3 МэВ. Обработка спектров выполнялась с помощью программного обеспечения Genie-2000. Перед измерениями образцы высушивались, гомогенизировались и выдерживались в герметичных сосудах в течение 30 дней для достижения радиоактивного равновесия. Время измерения каждого образца составляло не менее 24 ч. Датирование выполнено по методике неравновесного ^{210}Pb с применением модели Constant Flux [2, 3].

Сравнительный анализ проводился с данными по станции PS2719, исследованной в 1995 г. судном Polarstern (глубина 135 м), где было вскрыто более 7 м отложений [4, 5]. В 67 км к западу расположена станция PS2718 (глубина 155 см), изученная Левитаном и др. [6]. Средние скорости седиментации для голоцена составили 0.075 см/год (PS2718) и 0.034 см/год (PS2719), при этом в разные периоды наблюдались значительные колебания (от 0.011 до 0.12 см/год) (таблица).

По данным высокочастотного сейсмопрофилирования в разрезе, выполненном в районе станции PS2719, выделяется толща четвертичных отложений мощностью около 20 м с выраженной субгоризонтальной слоистостью. Высокое разрешение используемой аппаратуры позволило детально расчленить верхнюю часть сейсмического разреза. По данным

сейсмопрофилирования, строение верхней части осадочной толщи в точке взятия пробы хорошо коррелирует с выделенными в керне по геолого-геохимическим данным литозонами, характеризующими изменения условий осадконакопления [5]. Отражающие рефлекторы прослеживаются на глубинах около 80, 440 и 540 см от дна, определяемых как границы между литозонами, при этом на глубине около 440 см выделяется нижняя граница голоценовых отложений.

Таблица. Скорость седиментации в голоцене [5, 6].

Станция	Горизонт, см	Период	Скорость седиментации, см/год
PS2719	84	Н.в.–7459	0.011
	136	7459–8963	0.035
	289	8963–10380	0.1
	385	10380–11176	0.12
	473	11176–13617	0.036
PS2718	120	Н.в.–2710	0.044
	250	2710–5240	0.051
	400	5240–6900	0.09
	750	6900–10010	0.11

Помимо границы литозоны на глубине 80 см от дна, характеризующейся подъемом уровня моря до текущих отметок и переходом к современным условиям осадконакопления, в верхней голоценовой части разреза выделяется рефлектор на глубине около 250 см. В керне на этом горизонте был отмечен рост значений магнитной восприимчивости [5], что указывает на изменение количества привнесенного терригенного материала. Шельф масштабно затопило впервые после последнего ледникового максимума в этот период времени (около 10 тыс. лет назад), что привело, вероятно, к крупномасштабной эрозии морского дна и побережья и к увеличению поступления терригенного органического вещества [7].

Современные скорости седиментации (последние 150 лет) варьируют от 0.02 до 0.78 см/год при среднем значении 0.5 см/год, что на порядок выше фоновых значений голоцена. Этот скачок связан с окончанием малого ледникового периода и началом современного потепления. Полученные данные согласуются с исследованиями к востоку от района работ [8], где скорости также превышают 1 см/год.

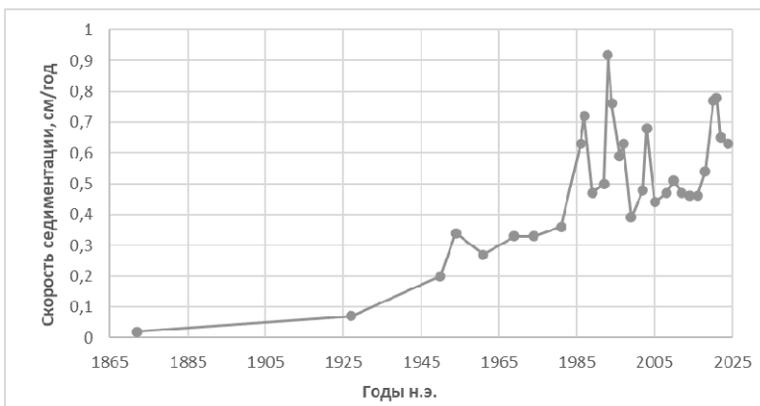


Рис. 2. Скорость седиментации на станции PS2719 после малого ледникового периода.

Таким образом, осадконакопление в западной части пролива Вилькицкого демонстрирует выраженную изменчивость в течение голоцена, находящуюся в тесной связи с климатическими колебаниями. Зафиксированное резкое увеличение скоростей седиментации в последнее столетие (на порядок превышающее фоновые значения) представляет собой четкий индикатор реакции седиментационной системы на современное потепление в Арктике. Полученные данные позволяют предположить, что наблюдаемый процесс является частью циклической динамики осадконакопления, характерной для климатических флуктуаций голоцена. Выявленные закономерности подчеркивают высокую чувствительность арктических седиментационных систем к климатическим изменениям и необходимость дальнейших исследований для понимания долгосрочных тенденций в условиях продолжающегося глобального потепления.

Работа выполнена в рамках госзадания ММБИ РАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikiforov S.L., Sorokhtin N.O., Ananiev R.A. et al. Investigations of the Western Arctic Shelf of Russia during the Cruise 56 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov // *Oceanology*. 2024. V. 64. P. 737–739. <https://doi.org/10.1134/S0001437024700413>
2. Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность. СПб.: Лань, 2022. 304 с. Электронный ресурс. <https://e.lanbook.com/book/184130> (дата обращения: 02.05.2023).
3. Sanchez-Cabeza J.A., Ruiz-Fernández A.C. 210Pb sediment radiochronology: an integrated formulation and classification of dating models // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. V. 82. P. 183–200.

4. Rachor E. Scientific Cruise Report of the Arctic Expedition ARK-XI/1 of the RVPolarstern in 1995 (German-Russian Project LADI: Laptev Sea - Arctic Deep BasinInterrelations) (Wissenschaftlicher Fahrtbericht über die Arktis-Expedition ARK-XI/1 von 1995 mit FS Polarstern) // Ber. Polarforsch. 1997. V. 226. P. 1–330. https://doi.org/10.2312/BzP_0226_1997.
5. Gromig R., Grunert P., Scheidt S., Melles M. Postglacial shelf erosion, riverine input and lake drainage in the eastern Kara Sea, Russia // Marine Geology. 2022. V. 451. 106865. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106865>.
6. Левитан М.А., Арнольд М., Буртман М.В. и др. К истории голоценовой седиментации в восточной части Карского моря // Океанология. 2000. Т. 40. № 4. С. 614–620.
7. Stein R., Boucsein B., Fahl K. et al. Accumulation of particulate organic carbon at the Eurasian continental margin during late Quaternary times: Controlling mechanisms and paleoenvironmental significance // Global and Planetary Change. 2001. V. 31(1). P. 87–104. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00114-X)
8. Rusakov V.Y., Lukmanov R.A., Savin A.S. About fluctuations in the excess ^{210}Pb flux into the East Siberian Arctic Shelf sediments, the Laptev Sea // J. of Environmental Radioactivity. 2024. V. 273. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2024.107387>

During the 56th expedition of the R/V Akademik Nikolay Strakhov in 2023, comprehensive studies of Holocene sedimentary deposits were conducted in the Vilkitsky Strait. The work included seismic profiling to investigate the structure of the sedimentary sequence, as well as the collection of sediment cores for granulometric analysis of deposits accumulated after the end of the Little Ice Age (LIA). Additionally, radioisotope dating (^{210}Pb , ^{137}Cs) was performed to determine their age and calculate sedimentation rates. The research enhances our understanding of sedimentation processes in the Arctic, revealing high variability in sedimentation rates in the Vilkitsky Strait during the Holocene.

Нечаев С.Ю.^{1,2}, Овсяченко А.Н.²

(¹Библиотека РАН, г. Санкт-Петербург, e-mail: donotdespair@yandex.ru; ²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, e-mail: ovs@ifz.ru)

**Таинственный остров Скобка на древних лощиях
Печорского моря как возможный маркер сильнейшего
сейсмического события**

Nechaev S.Yu.^{1,2}, Ovsyuchenko A.N.²

(¹Russian Academy of Sciences Library, Saint Petersburg; ²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow)

**The mysterious Skobka (Clamp) Island on ancient sailing
directions of the Pechora Sea as a possible marker of the
strongest seismic event**

Ключевые слова: лощия, Печорское море, Баренцево море, историческое землетрясение, исчезновение острова, палеосейсмодислокация

Исторические сведения об острове в Печорском море, его рельеф и исчезновение (не позднее XVII в.) говорят о катастрофическом землетрясении с интенсивностью не менее IX баллов. Сеймотектонический анализ полученных данных позволяет согласовать район возможного расположения исторического острова.

Речь идет о редких рукописных документах – лощиях, составленных не позднее XVII в., о которых сообщают очевидцы более поздних времен (возможно, имеется в виду один и тот же документ). Из-за недоступности оригиналов, мы можем говорить только о косвенных выводах. Тем не менее, история с исчезновением острова, отсутствующего на современных картах, согласуется с последними сеймотектоническими построениями.

Независимые доказательства существования острова. В опубликованном посмертно дневнике российского геолога К.И. Гревингга во время его геогностической экспедиции 1848 г. на п-ов Канин помещена следующая заметка: «От старика мещанина Попова я получил любопытные данные относительно острова “Скопка”. Известия эти ему сообщили старики, с которыми он виделся, будучи еще юношей; ему даже довелось видеть этот остров нанесенным на карты. Таким образом, остров этот существовал лет 100–150 тому назад. По одному из описаний, остров этот находился между Колгуевым и Новой Землей, ближе к последней. Одна сторона его была скалистая и обрывистая; другая же, пологая, служила местом скопления моржей и была усердно посещаемая промышленниками» [1, с. 32].

Отметим сразу, что вывод К.И. Гревингга о времени существования острова «лет 100–150 тому назад» (т.е. первая половина XVIII в.) носит приблизительный характер. Его информатор мог видеть гораздо более старые поморские карты-лощии, которые промышленники продолжали использовать столетиями. Само название острова может говорить о его

относительно небольших размерах, поэтому на печатных картах Печорского (Баренцева) моря со второй половины XVI в. [2] он не обнаруживается.

История повторилась спустя почти сто лет после К.И. Гревингга, когда остров был «переоткрыт» руководителем геоморфологических экспедиций 1930-х гг. на п-ов Канин и в юго-восточной части Баренцева моря, о чем следует привести цитату в подробностях: «В.П. Кальянову во время его работ на побережьях Баренцева моря удалось в одном из становищ познакомиться со старинной рукописной поморской лоцией. Время составления этой лоции В.П. Кальянов относит не позже, чем к XVII в. В ней даются подробнейшие указания для плаванья вдоль южных берегов Баренцева моря, приводятся сведения о течениях, льдах, якорных стоянках, местах, где можно отстояться во время штормов, и т.д. Среди последних упоминается остров Скобка, который, судя по описанию, имел форму слабо выгнутой подковы. Остров находился в юго-восточной части моря, где-то между устьем Печоры и Новой Землей. В лоции остров Скобка рекомендовался как хорошее место для отстоя деревянных судов во время штормовых погод. К сожалению, владелец поморской лоции не согласился уступить ее В.П. Кальянову, и потому никаких других подробностей об этом острове мы привести здесь не можем» [3, с. 78].

В двух описаниях совпадает примерное положение таинственного острова – между о. Колгуев и Новой Землей (ближе к последней), на уровне Печорской губы, что соответствует древним маршрутам поморов от Мурманского берега или Северной Двины до устья Печоры и юго-западных берегов Новой Земли [4, с. 57]. Примечательно, что часть острова, судя по описанию из лоции, была скалистой и обрывистой и использовалась поморами для отстоя судов во время штормов. По этой причине его исчезновение вряд ли можно объяснить только абразионной деятельностью моря. В связи с этим нами рассматривается гипотеза погружения острова в результате региональных сейсмоструктурных деформаций земной поверхности.

Сейсмоструктурный анализ полученных данных. Карта батиметрии Печорского моря, построенная по данным модели [5], показывает, что в районе предполагаемого положения о. Скобка есть возвышение морского дна изометричной формы. Невысокая точность батиметрической карты (15 угловых секунд) не позволяет отчетливо оценить глубины морского дна. Однозначно модель указывает лишь на гипотетическую возможность существования острова на участке (рисунок), намеченном нами по историческим материалам. Это обстоятельство подтолкнуло к более детальному анализу имеющихся данных по активной тектонике региона Печорского моря.

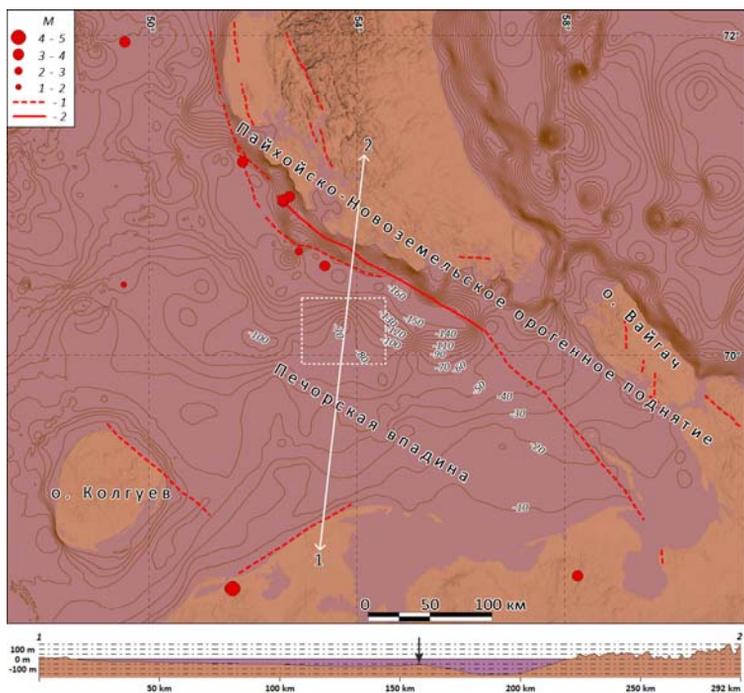


Рисунок. Схема батиметрии Печорского моря, активных разломов и сейсмичности. Район возможного расположения о. Скобка обозначен квадратом. Внизу – профиль рельефа по линии 1-2 с положением острова (стрелка ↓). Батиметрия по данным цифровой модели рельефа [5], сейсмичность по [6, 7]: 1, 2 – активные разломы: 1 – по структурно-геоморфологическим, геофизическим и дистанционным данным с использованием [8–10]; 2 – активный разлом по данным сейсмического профилирования высокого разрешения [11]

Участок возможного положения о. Скобка в тектоническом отношении намечен в районе крупнейшей региональной границы между Пайхойско-Новоземельским складчатым поясом и Тимано-Печорской плитой [12]. Земная кора Тимано-Печорской плиты приобрела тектонический облик молодой платформы с мощным осадочным чехлом и подвижным двухъярусным фундаментом после раннепалеозойского орогенеза. На новейшем этапе вдоль западной окраины раннекиммерийского Пайхойско-Новоземельского складчатого пояса начала оформляться неглубокая впадина, северная часть которой в настоящее время заполнена водами Печорского моря. Впадина имеет асимметричное строение – ее поверхность испытывает перекося в северо-восточном направлении, а максимальных глубин (160 м и более) морское дно достигает у юго-западных берегов

Новой Земли. Со стороны Новой Земли асимметричная Печорская впадина ограничена крутыми тектоническими уступами, вдоль которых сейсморазведкой выявлены смещения всех горизонтов осадочного чехла [9]. Мощность плиоцен-четвертичных отложений, маркирующих величину новейшего прогибания, у Новой Земли достигает 250–300 м [9, 13]. Здесь оформился предгорный прогиб, в пределах которого в течение всего позднего плейстоцена и голоцена не прекращалось накопление морских осадков [14]. При этом на большей части шельфа Западно-Арктических морей обнаруживаются многочисленные формы рельефа ледникового происхождения, оставленные ледниковым щитом последнего (Валдайского) оледенения [15 и др.].

Помимо общего тектонического перекоса и прогибания в режиме предгорного прогиба, на высокую неотектоническую активность Баренцево-Печорского шельфа указывают активные в плиоцен-четвертичное время разломные зоны, изученные вдоль северо-восточного побережья о. Колгуев [8] и западного побережья Новой Земли [9]. В голоцене все морфоструктуры шельфа испытали общее погружение, максимум которого в рассматриваемом районе приходится на приновоземельский участок Печорской впадины, где мощность голоценовых осадков достигает 10 м [14]. На Новой Земле образовалась лестница морских террас высотой от 1–2 до 110–118 м [13, 16]. Таким образом, имеется множество данных, свидетельствующих о продолжающемся и поныне прогибании Печорской впадины и воздымании Новой Земли. Их разделяет наиболее активная разломная зона рассматриваемого региона, выраженная смещением всего комплекса морских осадков, включая самые молодые [9].

Несмотря на низкую представительность данных инструментальных сейсмологических наблюдений, начатых в Арктике в конце 1950-х гг., граница между орогеном Новой Земли и Печорской впадиной проявила сейсмическую активность на уровне $M \leq 4.0$. Более того, в последние годы при оценке сейсмической опасности для сооружений в Печорском море геофизическими методами был обнаружен молодой тектонический разрыв, трассирующий «Североуральский сейсмический линеймент» [11] вдоль границы орогена Новой Земли и Печорской впадины. Амплитуда предположительно одноактного вертикального смещения в голоценовых отложениях (порядка 5 м) позволила оценить магнитуду древнего землетрясения $M=7.5-7.93$. Полученные оценки указывают на возможность катастрофических землетрясений, сопровождавшихся значительными площадными сеймотектоническими деформациями на больших территориях. Это обстоятельство подкрепляет нашу гипотезу о резком погружении о. Скобка в результате сейсмической катастрофы, однако отсутствие прямых взаимосвязей между рассматриваемыми явлениями оставляет решение поставленной проблемы открытым для дальнейших углубленных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Путешествие на полуостров Канин К.И. Гревингга. СПб., 1891.
2. Голубков А.Ю. От царства к империи. Карты России. М., 2017.
3. Солнцев Н.А. К вопросу об исчезнувших островах Баренцева моря // Вопросы географии. Сб. 12: Историческое землеведение. М., 1949. С. 71–78.
4. Белов М.И. Арктическое мореплавание с древнейших времен до середины XIX в. М., 1956.
5. GEBCO Bathymetric Compilation Group 2024. DOI: 10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f
6. Специализированный каталог землетрясений для задач общего сейсмического районирования территории РФ. М., 2012.
7. Vorobieva I.A. et al. Integrated Earthquake Catalog II: The Western Sector of the Russian Arctic // Applied Sciences. 2023. V. 13. № 12. P. 7084.
8. Крапивнер Р.Б., Скоробогатько А.В. Разрывные нарушения четвертичного чехла как отражение тектоники фундамента (о. Колгуев, Баренцево море) // Геотектоника. 2012. № 5. С. 44–62.
9. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39,40 – о. Колгуев–прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб., 2014.
10. Zelenin E. et al. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503.
11. Ковачев С.А., Либина Н.В. Оценки исходной сейсмичности для шельфовых сооружений на примере Печорского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 1. С. 165–175.
12. Тектоническая карта Арктики. Масштаб 1:10 000 000. СПб., 2019.
13. Мусатов Е.Е. Баренцево-Карский шельф // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. М., 2000. С. 23–41.
14. Павлидис Ю.А. и др. Печорское море: прошлое, настоящее и будущее // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 927–939.
15. МIRONЮК С.Г., ИВАНОВА А.А. Микро- и мезорельеф гляциального шельфа Баренцева и Карского морей в свете новых данных // Бюллетень Комиссии по изучению четвертичного периода. 2018. № 76. С. 41–58.
16. Кораго Е.А. и др. Геологическое строение архипелага Новая Земля (запад Российской Арктики) и особенности тектоники Евразийской Арктики // Геотектоника. 2022. № 2. С. 21–57.

Historical information about the island of the Pechora Sea, its relief and disappearance (not later than the 17th century) indicate a catastrophic earthquake with an intensity of at least IX points. Seismotectonic analysis of the obtained data allows us to agree on the area of the possible location of the historical island.

**Никишин А.М.¹, Алешина К.Ф.¹, Родина Е.А.¹,
Татаринов В.Ю.²**

(¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: amnishin@gmail.com; ²Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва)

**Новая модель геологической истории Арктического океана
Nikishin A.M.¹, Aleshina K.F.¹, Rodina E.A.¹, Tatarinov V.Yu.²**

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements, Moscow)

A new model of the geological history of the Arctic Ocean

Ключевые слова: Арктический океан, Канадский бассейн, история формирования, хребет Гаккеля

В истории формирования Арктического океана выделено 5 стадий развития. Основные отличия от преобладающих сейчас моделей истории океана сводятся к поздне меловому раскрытию Канадского бассейна и к широкому проявлению внутриплитного рифтинга в конце мела – палеоцене.

Нами опубликована серия статей по геологическому строению и истории формирования Арктического океана (например, [1, 2]). Основными соавторами статей являются Е.И. Петров, Н.А. Малышев, В.Е. Вержбицкий, G. Foulger, H. Posamentier и многие другие. В этих статьях приведена новейшая геолого-геофизическая информация и представлены наши аргументы относительно геологического строения и истории Арктического океана. Здесь мы кратко суммируем наши основные выводы. В истории Арктического океана мы выделяем следующие стадии развития (рис. 1, 2):

Поздняя юра – готерив. Возможный континентальный рифтинг. Вероятно, влияние Верхояно-Чукотской орогении.

Баррем (апт) – альб (~125–100 Ma). Формирование вулканотектонического поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов типа Подводников, Макарова, Стефанссона и др. Характерны магматические комплексы типа Seaward Dipping Reflectors (SDR) как для поднятия Альфа-Менделеева, так и для бассейнов. Было сильное растяжение континентальной коры, но разрыва ее не произошло. Тектоника была во внутриплитном режиме. Геодинамика объясняется наличием горячего вещества в мантии (плюм, горячее пятно, мантийное течение; есть разные варианты объяснения).

Поздний мел (100–70 Ma). Основная фаза раскрытия Канадского бассейна. Бассейн раскрывался как задуговой бассейн для Тихоокеанской зоны субдукции. Для пассивной окраины Канадского бассейна для склона хребта Нортвинд (Чукотский бордерленд) характерны магматические комплексы типа SDR с вероятным возрастом около 125–100 Ma. Из этого следует, что сам бассейн моложе континентальной окраины и моложе SDRs.

Поздний поздний мел – палеоцен (~70–56 Ma). Внутриплитный рифтинг, который охватил часть района Канадского бассейна, район моря Лаптевых и область будущего Евразийского бассейна. На огромной территории формировалось большое количество сбросов. В Амеразийском бассейне мы выделяем рифтовую систему Нортвинд-Север (от Чукотского бордерленда и до Север Спур на Канадской окраине), которая далее уходит в сторону залива Баффина. Это рифтовое событие связано уже с геодинамикой Атлантической системы.

Эоцен – квартал (56–0 Ma). Поэтапное раскрытие Евразийского бассейна. При этом, в основном между 45 и 34 Ma формировались многочисленные сбросы в районе поднятия Альфа-Менделеева. Многие сбросы формировались и в неогене. Было влияние юриканской орогении.

В нашей обновленной модели истории формирования Арктического океана есть две принципиально новые концепции. 1. Раньше большинство авторов, включая нас, считало, что Канадский бассейн раскрывался в раннем мелу. Сейчас после обнаружения комплексов типа SDR на континентальном склоне бассейна мы пришли к выводу о позднемеловом раскрытии Канадского бассейна. Такого рода модели предлагались и ранее разными исследователями, но не было четких аргументов. 2. В интервале времени 70–56 Ma крупномасштабное рифтовое событие охватило значительную часть современного океана. Этот рифтинг уже был связан с Атлантической геодинамической системой.

Авторы благодарны многим коллегам из России, Англии, США, Канады, Норвегии, Германии, Франции, Китая, Дании, Швеции за многочисленные дискуссии, которые способствовали нашему более корректному пониманию геологии Арктики.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант 24-17-00020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A. et al. Tectonic evolution of the Amerasia Basin, Arctic Ocean // *Gondwana Research*. 2025. V. 146. P. 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.06.005>
2. Nikishin A.M., Foulger G.R., Akinin V.V. et al. Arctic Cretaceous tectonic and igneous mega-province (TIMP): Regional domains and geodynamics // *J. Geodyn.* 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2024.102031>.

Five stages of development have been identified in the history of the Arctic Ocean formation. The main differences from the currently prevailing models of ocean history are the late Cretaceous opening of the Canadian Basin and the widespread occurrence of intraplate rifting at the end of the Cretaceous-Paleocene.



Рис. 1. На современной географической основе показаны основные тектонические и магматические структуры, сформированные в ходе четырех главных этапов формирования Арктического океана (А, Б, В, Г, рис 1 и 2). Основные новообразования показаны прозрачным цветом. 125–100 Ма: формирование структур области Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов; трапповый магматизм во многих местах; коллапс орогена в районе Чукотки. Белые жирные линии – оси спрединга океанической коры. Белые пунктирные линии – оси гипер-растяжения континентальной коры. Красная жирная линия – ось рифтово-вулканического поднятия Альфа-Менделеева. Красная стрелка – направление отодвигания Аляски.

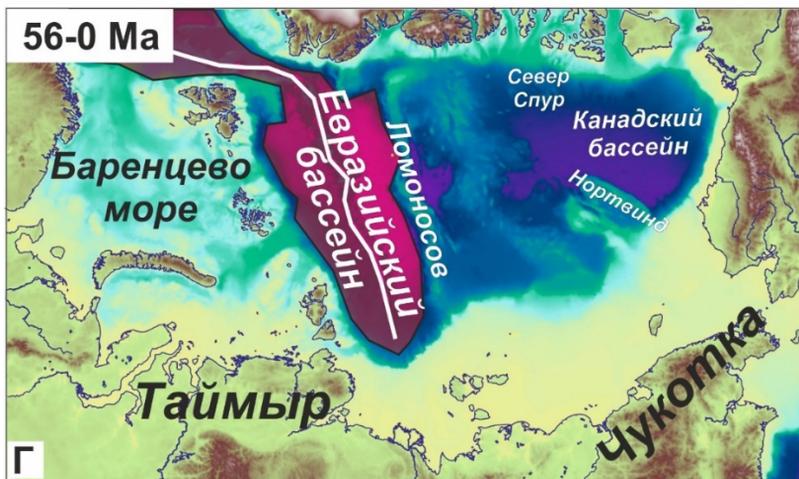
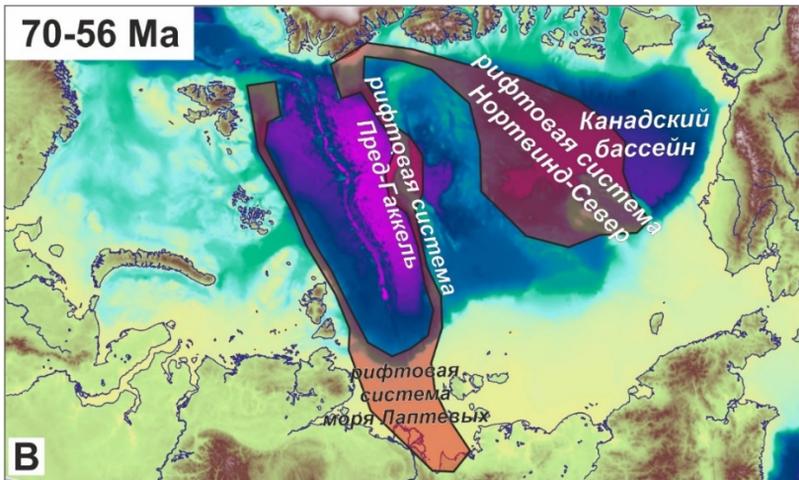


Рис. 2. На современной географической основе показаны основные тектонические и магматические структуры, сформированные в ходе четырех главных этапов формирования Арктического океана. Основные новообразования показаны прозрачным цветом. 100–70 Ма: раскрытие Канадского бассейна. 70–56 Ма: внутриплитный рифтинг и магматизм. 56–0 Ма: раскрытие Евразийского бассейна. Белые жирные линии – оси спрединга океанической коры. Белые пунктирные линии – оси гиперрастяжения континентальной коры. Красная жирная линия – ось рифтово-вулканического поднятия Альфа-Менделеева. Красная стрелка – направление отодвигания Аляски.

**Никишин А.М.¹, Хлебникова О.А.¹, Татаринов В.Ю.²,
Пилицын А.Г.², Алешина К.Ф.¹**

(¹МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: amnikishin@gmail.com; ²ФГБУ "ИМГРЭ", Москва)

Зона сочленения хребта Гаккеля и шельфа моря Лаптевых по данным батиметрии и сейсморазведки

**Nikishin A.M.¹, Khlebnikova O.A.¹, Tatarinov V.Yu.²,
Pilitsin A.G.², Aleshina K.F.¹**

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²FSBI "IMGRE", Moscow)

The junction zone between the Gakkel Ridge and the Laptev Sea shelf according to bathymetry and seismic survey data

Ключевые слова: Евразийский бассейн, гравитационные осадочные процессы, отложения транспорта масс (MTD), глубоководные каналы, рифтовая долина

В зоне перехода от Евразийского бассейна в море Лаптевых выделено три сегмента: (1) океанический рифт Гаккеля; (2) континентальный рифт в области континентального склона; (3) область рассеянного сбросообразования на шельфе моря Лаптевых. В области континентального склона выделены дельтовые комплексы рек Лена, Яна и Оленек. Для них типичны осадки транспорта масс и канално-турбидитовые системы. В сторону шельфа рифтовая долина все больше и больше заполнена осадочным материалом.

Район континентального склона между шельфом моря Лаптевых и Евразийским бассейном является одним из самых уникальных в мире. Здесь наблюдается переход от спредингового хребта Гаккеля (Садко) в континентальную рифтовую систему моря Лаптевых. Здесь также находятся четвертичные дельтовые системы и их дистальные части рек Лена, Яна и Оленек. Даная работа основана на интерпретации сейсмических профилей и данных новой батиметрии, полученных в 2022 и 2024 гг. Батиметрические данные и их первая интерпретация были опубликованы [1–4]. Мы также используем все геологические и геофизические данные.

Здесь мы кратко сформулируем некоторые основные выводы. Результаты работ показаны на серии рисунков (рис. 1–8).

1. Район континентального склона в основном сложен дистальными частями дельт рек Лена, Яна и Оленек суммарной толщиной более 3–4 км.

2. В осадочном комплексе преобладают отложения типа масс-транспорт (Mass Transport Deposits, MTD). В MTD хорошо выделяется минимум три домена (зоны): (1) зона (домен) стены отрыва, переходящая на глубине в детачмент (Headwall detachment scarp domain); (2) домен скольжения (Translation domain); (3) домен фронтальной зоны сжатия (Toe domain). Для MTD для их краев типичны латеральные уступы вдоль зон сдвига, переходящие на глубине в детачменты (Lateral detachment scarp). На

континентальном склоне выделяется несколько генераций МТД. Для МТД выделено несколько типов фаций.

3. В районе континентального склона выделены осадочные системы с глубоководными каналами с меандрами и комплексами типа леви (leveed channels) до турбидитовых фронтальных конусов выноса (frontal splay). Выделяется минимум три типа каналов: каналы с меандрами, выпрямленные каналы без меандр и линейные каналы типа борозд (grooves).

4. У подножья континентального склона рифтовая долина Хребта Гаккеля (Садко) доходит до континентального склона. В зоне перехода наблюдается три сегмента в сторону моря Лаптевых: (1) хорошо выраженный океанический рифт; (2) рифтовая долина, частично заполненная комплексами типа МТД; (3) полностью перекрытая осадками рифтовая долина, при этом некоторые молодые сбросы секут комплексы типа МТД. Для первого сегмента характерна океаническая кора, для второго – кора переходного типа, а для третьего – континентальная кора.

5. Анализ сейсмических профилей, геофизических полей, батиметрии и данных по сейсмичности позволяет выделить три зоны (сегмента) в области перехода от хребта Гаккеля до шельфа моря Лаптевых. (1) Океанический рифт Гаккеля (Садко) со скоростью спрединга от 8 до 0 мм/год. (2) Континентальный рифт в районе континентального склона. (3) Широкая область рассеянной сейсмичности и сбросообразования в районе шельфа. Примечательно, что поперечные сдвиговые зоны не устанавливаются и трансформный разлом не выделяется.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (грант 24-17-00020).

In the transition zone from the Eurasia Basin to the Laptev Sea, three segments have been identified: (1) the Gakkel oceanic rift; (2) the continental rift in the area of the continental slope; (3) the area of scattered fault formation on the shelf of the Laptev Sea. In the continental slope area, the delta complexes of the Lena, Yana, and Olenek rivers have been identified.

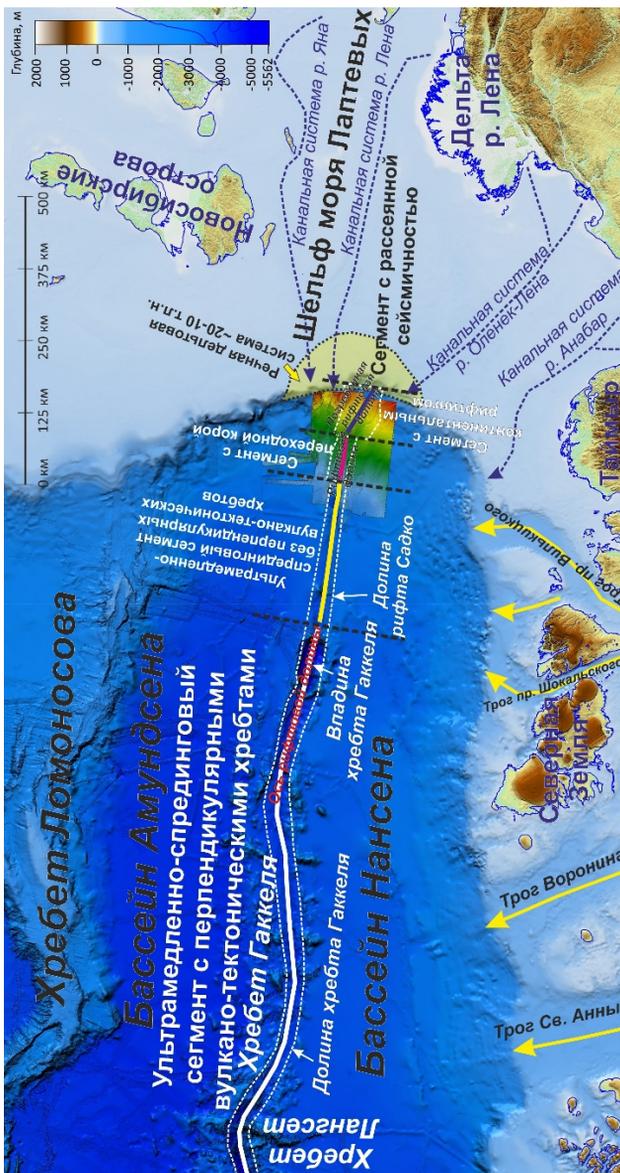


Рис. 1. Цифровая модель рельефа (ЦМР) части Евразийского бассейна и моря Лаптевых (<https://www.gebco.net/>) с нанесенными основными объектами зоны сочленения Евразийского бассейна и моря Лаптевых. На врезке показан район с детальной батиметрической съемкой (экспедиции Арктика-2022 и Арктика-2024)

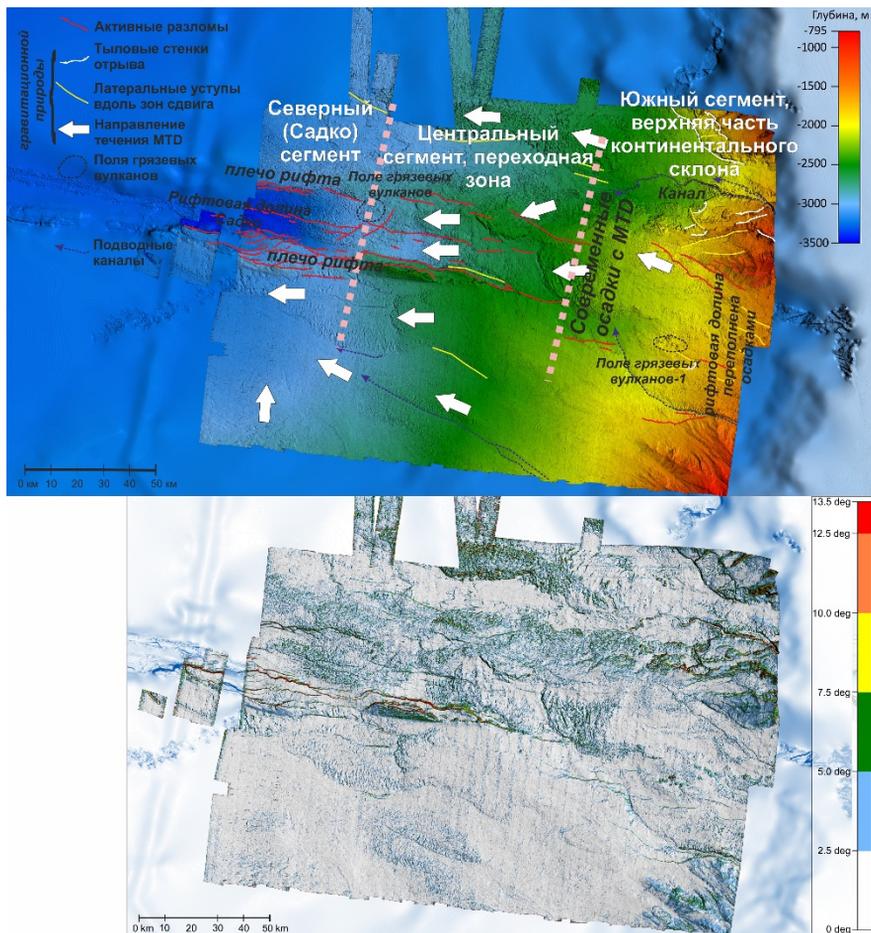


Рис. 2. ЦМР (<https://www.gebco.net/>) с наложенной детальной батиметрией 2022–2024 гг. с элементами интерпретации. Вверху карта глубин морского дна в метрах, внизу карта углов наклона поверхности морского дна. Цифровая модель батиметрии представлена МПР РФ и агентством Роснедра. Первые данные были опубликованы в [1–4].

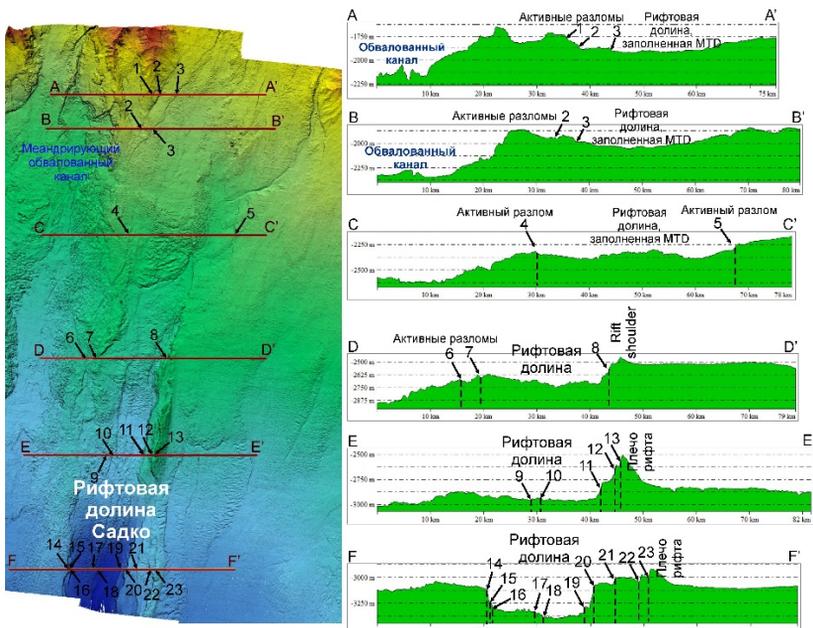


Рис. 3. Детальная ЦМР (слева) и профили рельефа (справа) с отмеченным положением активных разломов

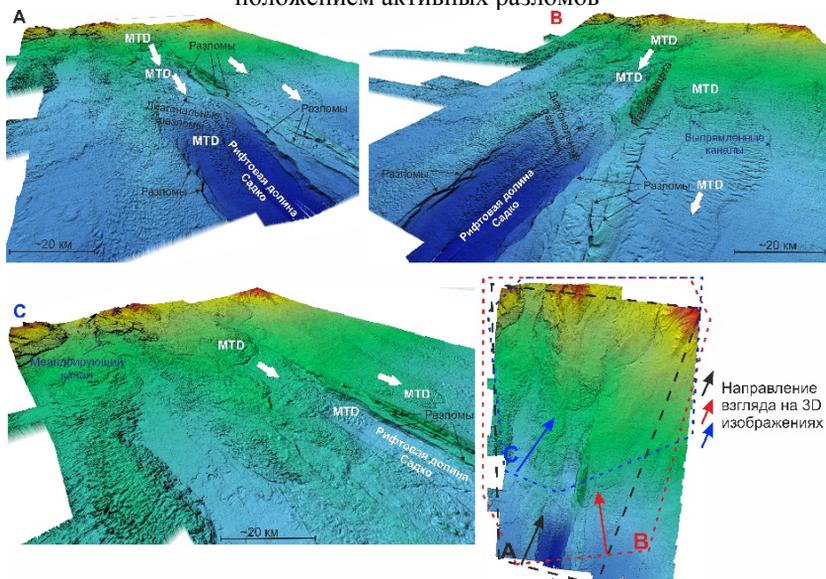


Рис. 4. 3D вид ЦМР с элементами интерпретации. Положение А-С показано внизу справа

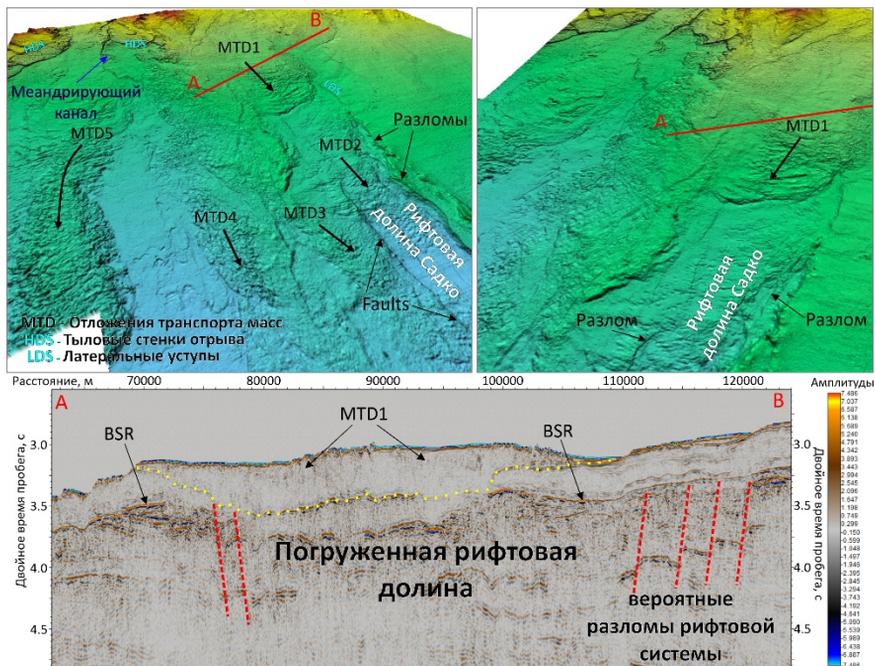


Рис. 5. Вверху 3D вид детальной ЦМР 2022–2024 гг. с элементами интерпретации, иллюстрирующий заполнение рифтовой долины Садко отложениями масс-транспорта (MTD). Внизу фрагмент сейсмического профиля



Рис. 6. Увеличенный фрагмент ЦМР 2022 г с элементами интерпретации, иллюстрирующий глубоководный меандрирующий канал с прирусловыми валами (levee)

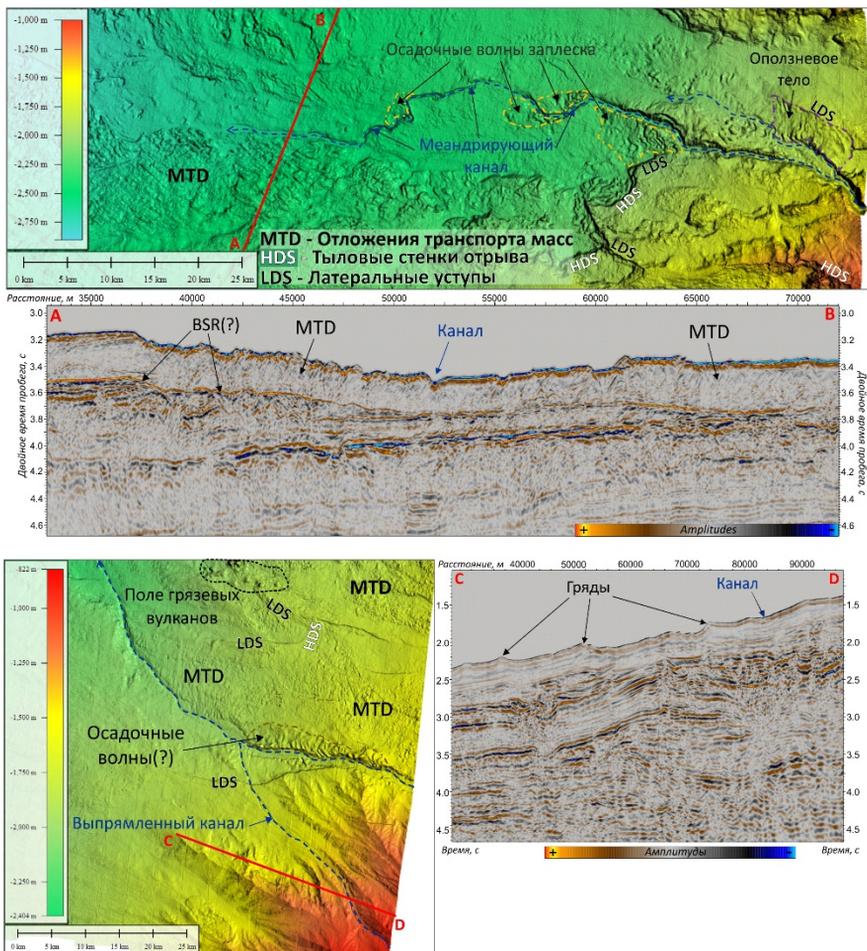


Рис. 7. Фрагменты ЦДР и сейсмических профилей с элементами интерпретации, иллюстрирующие разные типы гравитационных отложений на континентальном склоне зоны сочленения Евразийского бассейна и шельфа моря Лаптевых

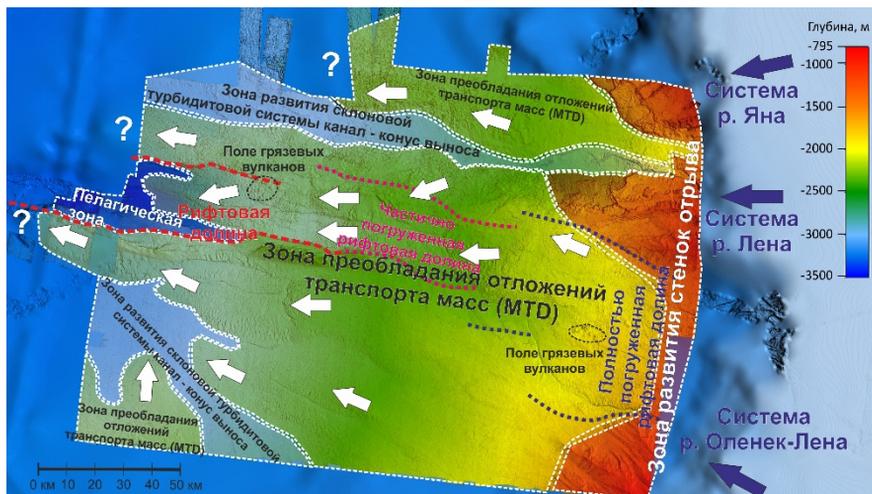


Рис. 8. Детальная ЦМР 2022-2024 г с нанесенными границами выделенных зон преобладающих осадочных процессов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каминский Д.В., Покровский Б.Г., Петров О.В. и др. Первая находка аутигенных карбонатов на прилаптевоморском фланге хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. №2. С. 219–224. doi: 10.31857/S2686739723601102
2. Каминский Д.В., Крылов А.А., Татаринов В.Ю. и др. Первые результаты исследований области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых в экспедиции Арктика-2024 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. № 11.
3. Каминский Д.В., Чамов Н.П., Жилин Д.М. и др. Новые данные о строении Лаптевоморского фланга хребта Гаккеля (Северный Ледовитый океан) // Литология и полезные ископаемые. 2024. № 6. С. 634–647. doi: 10.31857/S0024497X24060028
4. Зинченко А.Г., Егоров С.В., Фирсов Ю.Г. и др. Новые данные о рельефе прилаптевоморского сектора континентального склона Евразийского бассейна (по результатам батиметрических съемок 2022 и 2024 гг.) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. № 11. С. 146–157.

**Овсепян Е.А.¹, Захарова А.А.^{1,2}, Митрофанова Н.О.³,
Овсепян Я.С.³, Зенина М.А.¹**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, Россия e-mail: eovsepyan@ocean.ru; ²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, e-mail: sunnyju7@gmail.com; ³Геологический институт РАН, г. Москва, Россия, e-mail: yaovsepyan@yandex.ru)

Влияние речного стока на видовой состав сообществ и сохранность раковин бентосных фораминифер в Восточно-Сибирском море

**Ovsepyan E.A.¹, Zakharova A.A.^{1,2}, Mitrofanova N.O.³,
Ovsepyan Ya.S.³, Zenina M.A.¹**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia; ²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ³Geological Institute RAS, Moscow, Russia)

Influence of riverine discharge on species composition and preservation of benthic foraminiferal tests in the East Siberian Sea

Ключевые слова: растворение, продуктивность поверхностных вод, бенгальский розовый, современные сообщества, тафоценозы

Количественные анализы комплексов «живых» и мертвых бентосных фораминифер выполнены в образцах поверхностных донных осадков, поднятых в Восточно-Сибирском море в 2004 г. В результате исследования установлено, что более интенсивное растворение известковых раковин происходит в областях, находящихся под влиянием речного стока, а именно: в западной части бассейна и приустьевой зоне р. Колымы. Составлены карты распределения «живых» особой экологически-значимых видов бентосных фораминифер и прослежена связь между содержанием видов и распространением опресненных поверхностных вод.

Из-за быстрых климатических изменений, происходящих в настоящее время в Арктике, район Северного Ледовитого океана и прилегающих окраинных морей служит объектом пристального внимания исследователей и областью проведения работ по мониторингу изменений экосистем. Восточно-Сибирское море является самым труднодоступным морем среди других арктических морей России из-за непредсказуемой ледовой обстановки даже в течение короткого навигационного сезона. Однако в 2004 г. в ходе экспедиции НИС «Иван Киреев» был получен обширный материал, представленный более чем сотней образцов поверхностных донных осадков, собранных вдоль всего побережья ВСМ, в проливе Лонга и на Новосибирской отмели. Результаты анализов этих проб могут послужить как отправной точкой для мониторинга экосистем в ВСМ, так и основой для понимания распределения фауны в гидрологически и геохимически контрастных восточной и западной частях бассейна.

Образцы поверхностных донных осадков были отобраны небольшой драгой, оснащенной сетью с размером ячейки 100 мкм и позволяющей получать среднюю пробу для верхних 5 см осадка [2]. Сразу после отбора на борту судна образцы были промыты через сито с размером ячейки 100 мкм, а отмывая фракция была зафиксирована 96%-ым этиловым спиртом. После экспедиции материалы хранились в музейной коллекции Национального научного центра морской биологии им. А.В. Жирмунского ДВО РАН в г. Владивосток. Перед исследованием образцы были заново промыты и зафиксированы спиртовым раствором бенгальского розового с концентрацией красителя 2 г на 1 л 96%-го спирта для выделения раковин, содержащих цитоплазму [4]. Окрашенные таким способом пробы хранились при комнатной температуре не менее двух недель. После окрашивания фракции были промыты, а затем в них были проведены количественные анализы комплексов бентосных фораминифер.

Согласно методике, примененной в [1, 4], все найденные раковины были разделены на три группы по степени окрашенности и заполненности раковины цитоплазмой. Первая группа содержала экземпляры с заполняющей всю раковину, кроме последней камеры, и окрашенной в ярко-розовый цвет цитоплазмой. Такие экземпляры считались «живыми» на момент отбора [3]. Вторая группа включала в себя раковины с окрашенными органическими выстилками бледно-розового цвета и/или небольшим количеством ярко-розовой цитоплазмы, заполняющей незначительную часть раковины. Такие представители считались недавно жившими организмами, цитоплазма которых не успела полностью разложиться. Третья группа содержала неокрашенные пустые раковины БФ. Такие особи относились к мертвым. Агглютинирующие представители классифицировались как живые, если была окрашена область устья и просматривалась ярко окрашенная цитоплазма во всех камерах при смачивании раковины водой.

Анализ соотношения процентного содержания «живых», недавно живших и мертвых раковин показал, что степень сохранности известковых микрофоссилий неодинакова в западной и восточной части моря. В частности, высокая доля «живых» и недавно живших особей при крайне небольшом количестве мертвых БФ свидетельствует об интенсивном растворении известковых раковин, которое начинается сразу после гибели организма БФ, в западной части ВСМ за исключением Новосибирской отмели. Активное растворение биогенного карбоната может объясняться присутствием опресненных вод вблизи дна, которые связаны как со стоком р. Индигирки, так и с поступлением модифицированных вод р. Лены из моря Лаптевых. В восточной части бассейна доля значительная пустых раковин указывает на улучшение сохранности известковых микрофоссилий в областях, находящихся под влиянием соленых вод из Чукотского моря. Сопоставление придонной солёности в момент отбора пробы с процентным

содержанием пустых секреторно-известковых раковин в осадке показало, что при солености <25 епс доля пустых раковин, как правило, не превышает 10%. При более высоких значениях солености сохранность раковин сильно варьирует.

В западной части моря вблизи устья р. Индигирки в комплексе «живых» фораминифер доминируют секреторно-известковые виды *Elphidium clavatum*, *Haynesina orbiculare*, *Elphidiella groenlandica*. Преобладание указанных видов, вероятно, связано как с низкой соленостью придонных вод, так и с поступлением свежего органического вещества, которое образуется в поверхностном слое осадка при обилии биогенных элементов, принесенных реками. Содержание агглютинированных видов, таких как *Psammosphaera fusca*, *Reophax scorpiurus*, *Ammotium cassis*, невелико. Низкое содержание агглютинированных раковин может объясняться дефицитом преобразованного органического вещества в условиях обилия свежего детрита.

В восточной части среди «живых», напротив, доминируют агглютинирующие виды (в основном, *Ammotium cassis*), в то время как секреторно-известковые таксоны (*Pyrgo williamsoni*, *Globulina glacialis*) составляют меньшую часть комплекса. При этом среди недавно живших видов в восточной части встречаются те же виды, которые были найдены «живыми» в западной части ВСМ (*E. clavatum*, *H. orbiculare*, *E. groenlandica*), но в меньшем количестве. Это означает, что в начале сезона в восточной части ВСМ условия были благоприятными для развития такого комплекса. В частности, низкая соленость придонных вод и повышенная продуктивность поверхностного слоя могли сформироваться за счет максимального стока Сибирских рек в июле. Затем по мере сезонного снижения объемов стока рек Лены, Индигирки и Колымы площадь распространения и мощность опресненного слоя сокращалась, приводя к снижению поверхностной биопродуктивности, уменьшению потока свежего органического вещества на дно и осолонению придонного слоя в первую очередь в восточной части. Установление таких условий способствовало исчезновению «живых» особей видов, предпочитающих обстановки низкой придонной солености. Увеличение содержания агглютинирующих раковин некоторых видов может свидетельствовать о повышении доли измененного органического вещества в поверхностном слое восточной части ВСМ.

Интересно, что на станции 69 вблизи устья правой протоки р. Колымы комплекс секреторно-известковых фораминифер представлен исключительно видом *E. clavatum*. Найденные особи полностью окрашены в ярко-розовый цвет, однако, известковая раковина отсутствует. По-видимому, форма раковины поддерживается органическими выстилками после растворения известковой раковины. Пока остается неясным, были ли представители *E. clavatum* живыми на момент отбора в условиях отсутствия раковины, или же скорость растворения раковин в этом районе превышает

скорость деградации цитоплазмы.

Микропалеонтологические анализы проб из западной части ВСМ и интерпретация результатов выполнены в рамках Госзадания ИО РАН № FMWE-2024-0020. Количественные анализы комплексов бентосных фораминифер в пробах из восточной части моря проведены в рамках Госзадания ГИН РАН № ААААА21-121011590055-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овсеян Е.А., Овсеян Я.С., Митрофанова Н.О. и др. Комплексы бентосных фораминифер как индикаторы современных природных условий в северо-восточной части Восточно-Сибирского моря // *Океанология*. 2024. Т. 64. № 5. С. 792–806.
2. Шорников Е.И., Зенина М.А. Фауна донных остракод Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей (по материалам экспедиций ТОИ ДВО РАН) // *Морские исследования ДВО РАН в Арктике: Тр. Аркт. регион. центра*. Т. 4. Владивосток: Дальнаука, 2006. С. 156–211.
3. Bernhard J.M., Ostermann D.R., Williams D.S., Blanks J.K. Comparison of two methods to identify live benthic foraminifera: A test between Rose Bengal and CellTracker Green with implications for stable isotope paleoreconstructions // *Paleoceanography*. 2006. V. 21. PA4210.
4. Schönfeld J., Alve E., Geslin E. et al. The FOBIMO (FOraminiferal BIO-MOnitoring) initiative – Towards a standardized protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies // *Mar. Micropal.* 2012. V. 94–95. P. 1–13.

Quantitative analyses of “living” and dead benthic foraminiferal assemblages were carried out in 49 surface sediment samples collected from the East Siberian Sea in 2004. It has been inferred that strong dissolution of calcareous tests is related to riverine discharge areas, notably in the western part of the East Siberian Sea and near the Kolyma river mouth. Maps of the spatial distribution of several living benthic foraminiferal species were created. The relationship between species content and low-saline water mass distribution was analyzed.

**Пискарев А.Л.^{1,2}, Табырца С.Н.¹, Дергилева Е.А.^{1,3},
Киреев А.А.¹, Поселов В.А.¹, Элькина Д.В.¹, Безумов Д.В.¹**

(¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового Океана им. акад. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), г. Санкт-Петербург, e.mail: a.piskarev-vasilev@vniio.ru; ²Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле, г. Санкт-Петербург; ³Санкт-Петербургский Горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург)

Этапы формирования земной коры центральной области Евразийского бассейна

**Piskarev A.L.^{1,2}, Tabyrtsa S.N.¹, Dergileva E.A.^{1,3},
Kireev A.A.¹, Poselov V.A.¹, Elkina D.V.¹, Bezumov D.V.¹**

(¹Gramberg All-Russia Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), St. Petersburg, e-mail: a.piskarev-vasilev@vniio.ru; ²St. Petersburg State University – Institute of Earth Sciences, St. Petersburg; ³St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II, St. Petersburg)

Stages of the Earth's Crust Formation in the Central Region of the Eurasian Basin

Ключевые слова: осадочные комплексы, земная кора, линейные магнитные аномалии, тектоника, хребт Гаккеля, Евразийский бассейн.

На основе совместной интерпретации данных МОВ ОГТ и МПВ по профилю 1407, пересекающему Евразийский бассейн целиком, выполнен анализ геологического строения центральной области Евразийского бассейна. Полученные результаты определения возраста осадочных пород по скоростной характеристике легли в основу построения модели земной коры центральной части Евразийского бассейна.

После завершения первого этапа аэромагнитных съемок и открытия в нем системы линейных магнитных аномалий, характерных для дна океана [1], Евразийский бассейн рассматривался как классический океанский бассейн. Согласно этой гипотезе, Евразийский бассейн возник в кайнозойское время в результате разрастания океанического дна, за счет прироста океанической коры в осевой зоне хребта Гаккеля [2, 3]. Спредингу предшествовал континентальный рифтинг, начавшийся в конце мела и продолжавшийся в палеоцене. При этом хребт Ломоносова, будучи ранее присоединенным к Евразийской плите, постепенно дрейфовал к северо-востоку, пока не занял свое современное положение [4].

В то же время наблюдаются и описаны многочисленные факты, не увязывающиеся со столь простой историей образования и развития Евразийского бассейна и хребта Ломоносова. К ним относятся: асимметрия рельефа дна (рис. 1) и фундамента глубоководных котловин, отсутствие упорядоченности в пространственном распределении и мощностях отдельных слоев осадочных пород, асимметричное и несогласное относительно простирания хребта Гаккеля положение градиентных зон

гравитационных и магнитных аномалий. В направлении с запада на восток уменьшается число достоверно прослеживаемых полосовых магнитных аномалий. К востоку от 75° в.д. наблюдается явная асимметрия аномалий потенциальных полей относительно современной оси спрединга, располагающейся в рифтовой долине хр. Гаккеля. При этом область полосовых магнитных аномалий в котловине Амундсена заметно шире, чем в котловине Нансена. Наконец, при приближении к континентальному склону моря Лаптевых, южнее 80° с.ш., аномалии, соответствующие направлению рифтовой долины хр. Гаккеля прослеживается лишь в узкой зоне.

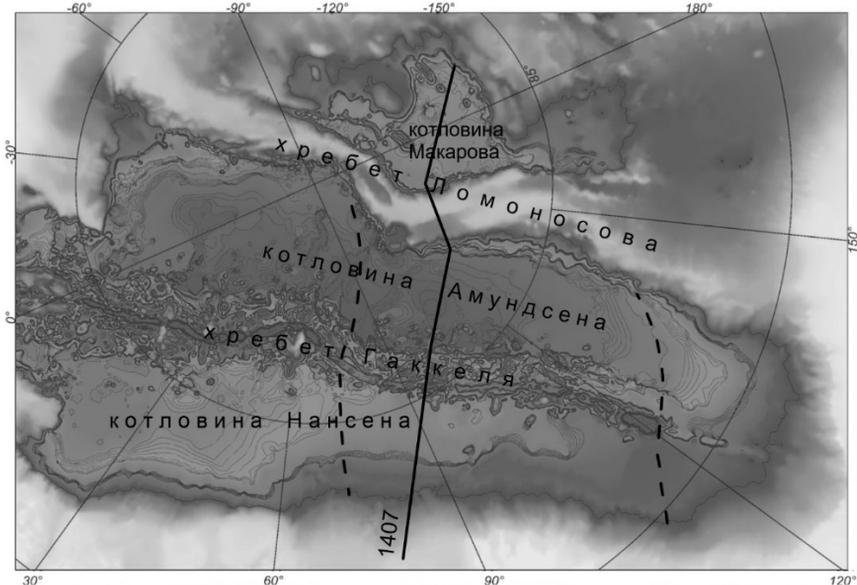


Рис. 1. Евразийский бассейн Северного Ледовитого океана. Пунктирные линии – границы центральной области.

В 2011–2020 гг. в Евразийском бассейне Северного Ледовитого океана выполнен значительный объем сейсмических работ, позволивших изучить на ряде профилей строение котловин Нансена и Амундсена. В 2019–2020 гг. выполнено 15 пересечений хребта Гаккеля и его рифтовой долины с использованием профилографа и с проведением на ряде профилей сейсмоакустического профилирования. Выполненные исследования показывают, что хребет Гаккеля – структура, начало образования которой относится к интервалу времени начало олигоцена (34 млн. лет) – начало миоцена (23 млн. лет), в процессе коренной перестройки кинематики спрединга в уже существовавших океанических бассейнах в районах Северной Атлантики и Арктики. Фундамент хребта Гаккеля частично

сложен океаническими базальтами, но преимущественно – породами глубинного происхождения, габбро и перидотитами, выведенными на поверхность в процессе сопутствующего спредингу скольжения по detachment. Прилаптевоморское продолжение рифтовой долины хребта Гаккеля, к югу от кальдеры, проходит над многокилометровой толщей осадков, в основании которой залегают осадочные породы мелового, и, возможно, позднеюрского возраста [5].

Новые сейсмические данные позволяют подразделить хребет Гаккеля на три сегмента. К западу от 75° в.д. рифтовая долина проходит примерно посередине хребта Гаккеля, как это и должно быть в предположении, что она проходит вдоль оси спрединга, образовавшего этот хребет. Восточнее 75° в.д. рифтовая долина смещена к юго-западному краю хребта, что приводит к выводу о сравнительно недавнем (плиоценовом) перескоке оси спрединга в современное положение. Наконец, к югу от кальдеры Гаккеля (около 120° в.д., 81° с.ш.) рифтовая долина предстает на разрезах как молодой грабен в многокилометровой толще осадков (см. рис. 1) [6].

К западу от 75° в.д. высокоамплитудные линейные магнитные аномалии расположены симметрично по обе стороны от хребта Гаккеля. В восточной части Евразийского бассейна линейные магнитные аномалии, примерно параллельные современной оси спрединга, наблюдаются только в узкой зоне котловины Нансена и в гораздо более широкой части котловины Амундсена. На значительной площади котловины Нансена и в примыкающей к хребту Ломоносова зоне котловины Амундсена четкие линейные магнитные аномалии не наблюдаются. В области Евразийского бассейна, примыкающей к шельфу моря Лаптевых, также следует констатировать отсутствие четких линейных магнитных аномалий за исключением узкой зоны вблизи рифтовой долины вдоль современной оси спрединга.

По сейсмическим и геологическим данным на континентальном склоне котловины Нансена со стороны Таймыра и Баренцево-Карской окраины прослеживаются юрско-раннемеловые осадочные комплексы. Со стороны южной части хребта Ломоносова и лаптевоморского шельфа осадочный чехол начинается с апта, перекрывая позднекиммерийское складчатое основание. Эти факты указывают на то, что Евразийский бассейн возник задолго до начала спрединга, примерно на 140–120 млн. лет раньше. По данным сейсмических исследований, возраст хребта Гаккеля миоцен–четвертичный [7].

Геолого-геофизические данные последних лет свидетельствуют о существенном отличии строения центральной области Евразийского бассейна от его западной части и, в еще большей степени, от прилаптевоморской части. Анализ геологического строения области в выполненной работе основывается на совместной интерпретации сейсмических данных МОВ ОГТ и МОВ-МПВ по профилю 1407,

единственному профилю, пересекающему весь Евразийский бассейн (рис. 2).

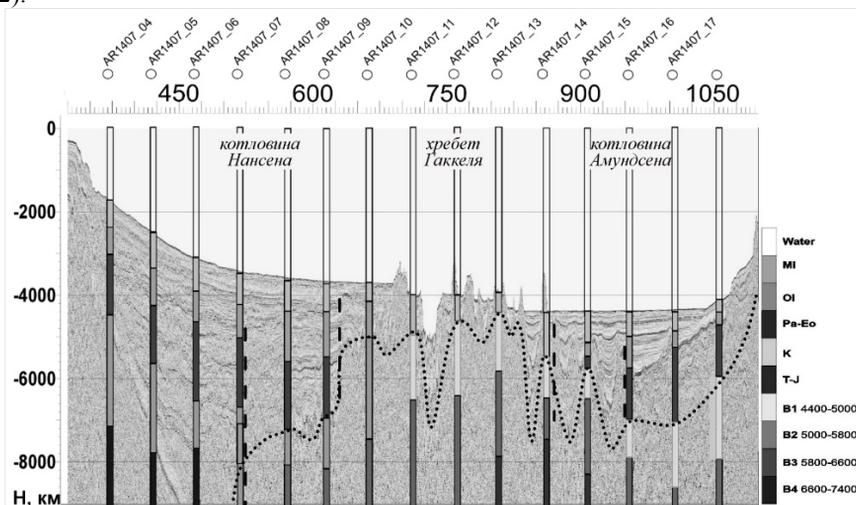


Рис. 2. Глубинный сейсмический разрез по профилю 1407 с наложенными возрастными колонками по пунктам МПВ. Пунктирные линии – зоны разломов, точки – приблизительное положение кристаллического фундамента.

Полученные новые данные по рассчитанному по скоростной характеристике возрасту осадочных пород [8] легли в основу построения модели земной коры центральной части Евразийского бассейна. Хребет Гаккеля является продуктом спрединга неогенового времени, так как нигде на хребте не отмечено присутствие осадочных пород более древнего возраста. В кристаллической части земной коры хребта Гаккеля просматриваются толщи, скоростная характеристика которых свойственна слоям 2 и 3 океанической земной коры. Граница Мохоровичича находится на больших глубинах, чем глубины, доступные по данным анализа МПВ, то есть на глубине более 5 км от дна, что соответствует данным работ ГСЗ в регионе [9]. В котловине Хансена возраст пород, скачкообразно увеличивается по направлению от хребта Гаккеля к Баренцево-Карскому шельфу. В породах, залегающих в основании осадочной толщи, вслед за олигоценовыми толщами появляются породы палеогенового, мелового и юрского возраста. На профиле 1407 на протяжении 55 км к югу от хребта в основании разреза фиксируются олигоценовые осадочные толщи. Далее, на протяжении 105 км в основании разреза мы видим толщи, отложенные в палеогене, а затем в основании разреза появляются мощные меловые и юрско-меловые толщи. По-видимому, соответственно изменяется и возраст

кристаллической части океанической земной коры. В котловине Амундсена в основании разреза прослеживаются толщи не древнее палеогеновых. Возраст осадочных толщ котловины Амундсена следует оценивать с большей осторожностью, поскольку в прилегающей к хребту Гаккеля 100-километровой полосе разреза 1407 рельеф фундамента осложнен рядом поднятий, и осадочные толщи, включая и олигоценовые, подвергнуты складчатости. Тем не менее, в основании разреза везде прослеживаются толщи не древнее палеогеновых. Таким же, вероятно, следует считать и возраст фундамента этой части котловины Амундсена. Меловые толщи появляются на разрезах уже в пределах морфологически выраженного хребта Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карасик А.М. Магнитные аномалии хребта Гаккеля и происхождение Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана // Геофизические методы разведки в Арктике. Л.: НИИГА, 1968. Вып. 5. С. 8–19.
2. Kristoffersen Y. The Eurasia Basin: an update from a decade of geoscientific research // *Polarforschung*. 2000. 68. P. 11–18.
3. Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н. и др. История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геосторического анализа аномального магнитного поля // *Геотектоника* 2006. № 4. С. 21–42.
4. Brozena J.M., Childers V.A., Lawver L.A. et al. New aerogeophysical study of the Eurasia Basin and Lomonosov Ridge: Implications for basin development // *Geology*. 2003. V. 31. № 9. P. 825–828.
5. Пискарев А.Л., Каминский В.Д., Поселов В.А. и др. Морфология и строение осадочного чехла протяженных сегментов хребта Гаккеля // *Докл. РАН. Науки о Земле*. 2023. Т. 509. № 1. С. 14–19.
6. Piskarev A.L., Kaminsky V.D., Kireev A.A. et al. The Structure of the Gakkell Ridge: Geological and Geophysical Data // *Geotectonics*. 2023. V. 57. Suppl. 1. P. S84–S99.
7. Арктический бассейн (геология и морфология) / под ред. В.Д. Каминского. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2017. 291 с.
8. Faust L.Y. Seismic velocity as a function of depth and geologic time // *Geophysics*. 1951. V. 16. P. 192–206.
9. Tao Zhang, Jiabiao Li, Xiongwei Niu et al. Highly variable magmatic accretion at the ultraslow-spreading Gakkell Ridge // *Nature*. 2024. V. 633. P. 109–113.

Based on the joint interpretation of refraction and reflection seismic data along profile 1407, which crosses the entire Eurasian Basin, the geological structure of the central region of the Eurasian Basin was analyzed. The results of determining the age of sedimentary rocks based on their velocity characteristics were used to build a model of the Earth's crust in the central part of the Eurasian Basin.

**Правикова Н.В., Жарков А.Д., Коротаев М.В., Чижова Е.Р.,
Алешина К.Ф., Никишин А.М.**

(МГУ им. М.В.Ломоносова, Геологический факультет, email: npravikova@mail.ru)

Кинематическая реконструкция композитного профиля Канадского бассейна

**Pravikova N.V., Zharkov A.D., Korotaev M.V., Chizhova E.R.,
Aleshina K.F., Nikishin A.M.**

(Moscow State University, Geological Faculty)

Kinematic Restoration of Composite Profile in Canada Basin

Ключевые слова: Арктика, скоростная модель, балансированные разрезы, Канадский бассейн

Проведена интерпретация и построены балансированные разрезы для композитного профиля Канадского бассейна. Построена скоростная модель. Определена последовательность смещения отдельных блоков по сбросам и последовательность формирования рифтовой долины, рассчитан коэффициент растяжения.

Выполнена интерпретация композитного сейсмического профиля Канадского бассейна, пересекающего осевой рифт и рифт 78 градуса [1]. На профиле выделены следующие горизонты: морское дно (SB); горизонты IC1, IC2, IC3, IC4, расположенные внутри кайнозойских отложений; граница R-PR (рифт-пострифт) 56 млн. лет; эрозионная граница между мелководными и глубоководными осадками, 70 млн. лет; поверхность акустического фундамента (Base), возраст которой может быть определен в интервале 118–112 млн. лет на основании $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраста базальтов, драгированных на шельфе Чукотского моря [2].

Для преобразования профиля в глубинный масштаб была построена скоростная модель для Канадского бассейна [3]. Материалами послужили данные 145 акустических буев (сонобуев) по Канадскому бассейну (рис. 1). База данных по акустическим буям [4] в Канадском бассейне собрана в единый проект и сопоставлена с данными интерпретации сейсмических профилей. Трехмерная скоростная модель Канадского бассейна сформирована как слоистая модель с отдельными зонами, для каждой из которых используется свой скоростной закон. Границы зон хорошо выделяются на сейсмических профилях по смене сейсмической записи и характеризуются относительно постоянными скоростями прохождения сейсмических волн.

Каждая из зон модели использует свой скоростной закон: постоянная скорость для интервала дневная поверхность – SB, карты распределения скоростей для интервалов SB–IC1, IC1–IC2, IC2–Base. Карты скоростей построены по данным скоростей сейсмических волн акустических буев, осредненных на интервалы модели. Для интервала SB–IC1 скорости

варьируют в пределах 1600–1750 м/с, IC1–IC2 1950–2300 м/с, IC2–Base 2200–4700 м/с.

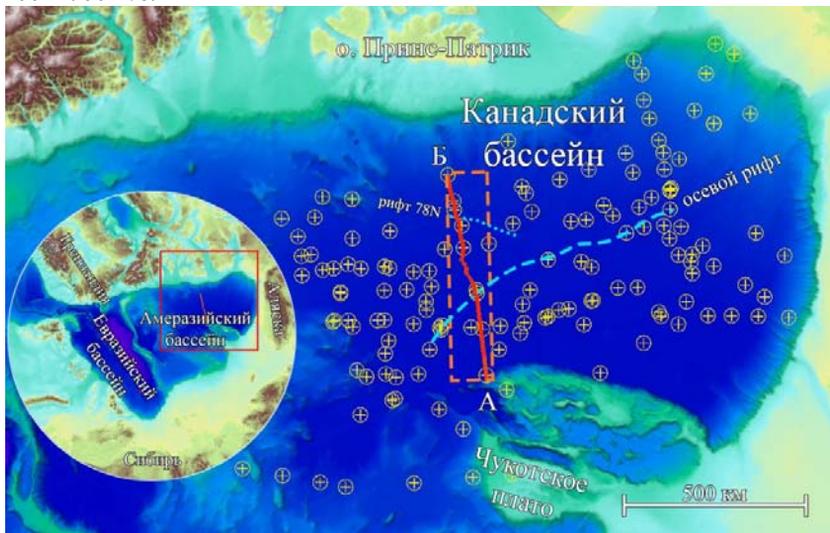


Рис. 1. Расположение акустических буев (белые метки), композитного сейсмического профиля (красная линия) и региона построения скоростной модели (оранжевый прямоугольник пунктиром) в Канадском бассейне. Карта батиметрии по [5]. Пунктирными голубыми линиями показаны осевой рифт и рифт 78 градуса (78N).

С помощью созданной скоростной модели композитный профиль был преобразован из временного в глубинный масштаб. В результате определены глубины основных структур. Так, высота вулканической постройки составляет около 1,5 км. Наиболее глубокая точка осевого рифта – 9450 м, рифта 78 градуса – 10 450 м. Кровля акустического фундамента на плато между рифтами находится на отметках 6940–7760 м, что соответствует полученным ранее данным [4]. Таким образом, глубины рифтовых долин осевого рифта и рифта 78 градуса составляют 1670 и 3300 метров соответственно.

Для проверки правильности интерпретации и восстановления ключевых моментов геологической истории был построен балансированный разрез по проинтерпретированному профилю (рис. 2) и произведена его кинематическая реконструкция. Для этого был использован метод двухмерного кинематического восстановления, иногда называемый методом сбалансированных разрезов.

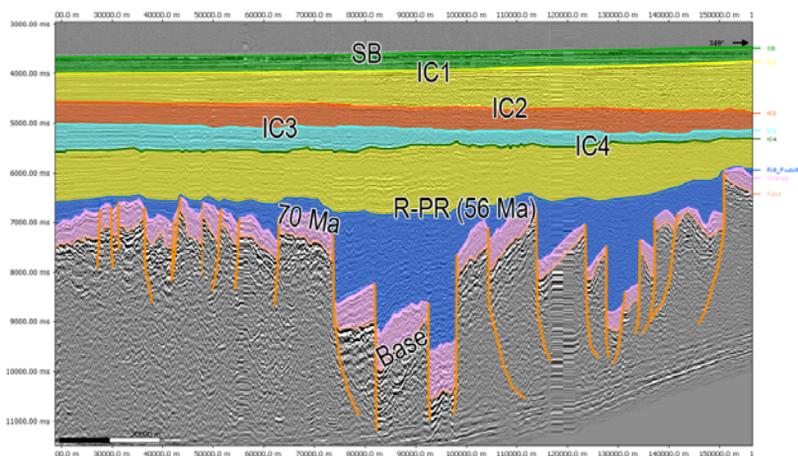


Рис. 2. Проинтерпретированный профиль, подготовленный для балансировки в программе Move.

Построение сбалансированных разрезов (рис. 3) проводилось в программном комплексе Move с использованием модуля 2D Kinematic Modeling. Разрез рифта 78 градуса может быть кинематически восстановлен с помощью последовательного комбинирования трех основных методик: 1) снятия слоев с учетом разуплотнения пород (Backstripping); 2) моделирования движения по разломам (2D Move-on-Fault) и 3) выпрямления слоев на додеформированное состояние – момент окончания осадконакопления (2D Unfolding). Для простой геологической структуры, формирующейся в обстановке растяжения/сжатия, наиболее применим алгоритм простого сдвига (Simple Shear).

В разрезе постепенно, от молодым к древним, снимались слои, нижележащие отложения разуплотнялись. После снятия всех вышележащих слоев разрез был выровнен на границу 70 млн. лет, проведено восстановление подвижек по разломам.

В результате коррекции первичной интерпретации сейсмического профиля были уточнены направление и кинематика разломов, определены положение центральных осей рифтовых долин, оценена высота и глубина основных структур. Исправлена конфигурация отражающих горизонтов на пересечении с разломами. Откорректированы мощности синрифтовых осадков в соседних блоках.

В результате моделирования определена последовательность смещения отдельных блоков по сбросам и последовательность формирования рифтовой долины, рассчитан коэффициент растяжения.

Восстановленные этапы формирования рифта 78 градуса коррелируют с основными событиями в Канадском бассейне [6].

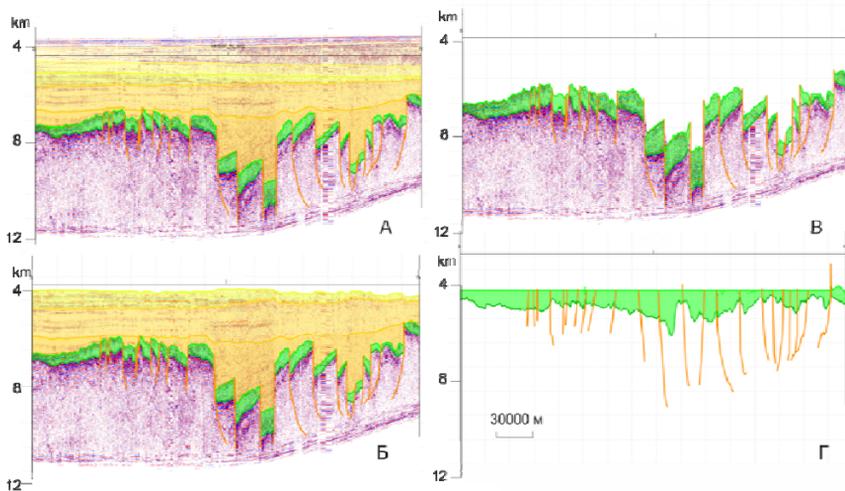


Рис. 3. Построение сбалансированных разрезов проводилось в программном комплексе Move. А – подготовленный для балансировки разрез; Б – разрез со снятыми отложениями интервала SB–IC2, нижележащие отложения разуплотнены; В – разрез со снятыми отложениями интервала SB–70 млн. лет, нижележащие отложения разуплотнены; Г – разрез, выровненный на поверхность 70 млн. лет.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00020, <https://rscf.ru/project/24-17-00020/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижова Е.Р., Алешина К.Ф., Никишин А.М., Родина Е.А. Сейсмическая интерпретация опорного геолого-геофизического разреза через Канадский бассейн Арктического океана // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2025. Материалы LVI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2025. С. 626–630.
2. Mukasa S.B., Andronikov A., Brumley K et al. Basalts from the Chukchi Borderland: $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ Ages and Geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean // American Geophysical Union. 2020. doi: 10.1029/2019JB017604
3. Жарков А.Д., Правикова Н.В., Коротаев М.В. и др. Модель строения чехла Канадского бассейна по данным акустических буев // Тектоника и геодинамика земной коры и мантии: фундаментальные проблемы-2025. Материалы LVI Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2025. С. 191–194.
4. Chian D., Lebedeva-Ivanova N. Atlas of Sonobuoy Velocity Analyses in Canada Basin; Geological Survey of Canada, Open File 7661, 2015. 1 zip file. doi:10.4095/295857

5. Jakobsson M., Mayer L.A., Bringsparr C. et al., The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean Version 4.0. // Sci. Data. 2020. V. 7. 176. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0520-9>

6. Никишин А.М., Алешина К.Ф., Родина Е.А. и др. Канадский бассейн Арктического океана: модели геологического строения, истории и геодинамики формирования // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2024. Т. 63. № 5. С. 3–22. DOI: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-5-3-22

An interpretation was performed and balanced sections were constructed for the composite profile of the Canadian Basin. A velocity model was constructed. The sequence of displacement of individual blocks along faults and the sequence of rift valley formation were determined, and the extension coefficient was calculated.

**Родина Е.А.¹, Никишин А.М.¹, Алешина К.Ф.¹,
Бакирова С.А.¹, Посаментиер Х.У.²**

(¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: rodina_liza@mail.ru; ²Posamentier Geosciences LLC, г. Бодега Бэй, США)

**Карбонатные постройки и тектоностратиграфия поднятия
Менделеева (Арктический океан)**

**Rodina E.A.¹, Nikishin A.M.¹, Aleshina K.F.¹, Bakirova S.A.¹,
Posamentier H.W.²**

(¹Lomonosov Moscow State University, Moscow; ²Posamentier Geosciences LLC, Bodega Bay, USA)

**Carbonate buildups and Tectonostratigraphy of the Mendeleev
Rise (Arctic Ocean)**

Ключевые слова: Арктический океан, карбонатные платформы, патч-риффы, поднятие Менделеева, тектоностратиграфия.

В палеоцен–эоценовое время на батиметрических возвышенностях поднятия Менделеева формируются карбонатные постройки. Время формирования карбонатных палеоцен–эоценовых отложений выпадает на относительно спокойный тектонический режим и на самый низкий уровень моря за период времени с позднего мела. Стремительный подъем уровня моря и возобновление вертикальных тектонических движений приводят к полному прекращению карбонатной седиментации в среднем эоцене.

Район изучения – поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные с ним глубоководные бассейны, а также шельф Чукотского моря – расположен в Северо-Ледовитом (Арктическом) океане, в пределах Американо-Чукотского глубоководного бассейна.

Вулкано-тектоническое поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные глубоководные бассейны сформировались 125–100 млн. лет назад в результате континентального растяжения и обширного магматизма [2].

После завершения континентального рифтинга и вулканизма в сопряженных с поднятием бассейнах происходит пострифтовое погружение. С позднего мела по палеоцен для всей территории фиксируется большое количество сбросов. Поднятие Менделеева испытывает воздымание, в то время как Северо-Чукотский бассейн испытывает прогибание (рис. 3). Осадки с приблизительным возрастом от 100 Ма до 80 Ма формируются только в центральных частях бассейна (рис. 2). После 80 Ма осадочный чехол распространяется повсеместно. С позднего мела по палеоцен происходит накопление мощного клиноформного комплекса, проградирующего с востока на запад, в сторону поднятия Менделеева, что указывает на постепенное постоянное уменьшение уровня моря с позднего мела по палеоцен. Дистальное положение клиноформного комплекса

маркируется бровкой террасы Кучерова в современном рельефе. На поднятии Альфа-Менделеева с 80 до 56 Ма формируется конденсированный мелководный разрез (рис. 2).

В палеоцен–раннеэоценовое время на батиметрических возвышенностях поднятия Менделеева формируются карбонатные постройки – «патч» рифы (~50–100 м в высоту и протяженностью ~100–500 м), которые со временем перекрывают карбонатные платформы (до 400 м в высоту и протяженностью ~3–7 км) (рис. 1). Подробный обзор карбонатных построек, обнаруженных нами в районе изучения, представлен нами в работе [3]. Контуры карбонатных построек представлены высокоамплитудными рефлекторами. Наиболее крупные постройки характеризуются внутренним горизонтально-слоистыми и клиноформным строением. Время формирования карбонатных построек совпадает с событиями палеоцен–эоценового термического максимума (PETM) и климатического оптимума раннего эоцена (EEO).

Время формирования карбонатных палеоцен–раннеэоценовых отложений на поднятии Менделеева выпадает на относительно спокойный тектонический режим (рис. 3). На композитном профиле, проходящем через поднятие Менделеева и Северо-Чукотский бассейн (рис. 2Б) видно, что время начала формирования патч-рифов на поднятии Менделеева выпадает на самый низкий уровень моря за период с 70 Ма. Затем, во время формирования карбонатных платформ начинается относительный подъем уровня моря.

В период 45–20 Ма (рис. 3) происходит возобновление вертикальных тектонических движений. На склоне поднятия Менделеева на границе с бассейном Толля обнаружена мощная линза осадков, перекрывающая карбонатные постройки. Внутри линзы идентифицируются глубоководные комплексы осадков транспорта масс (или MTD). По наклону сбросов в комплексах MTD также можно сделать вывод о возобновлении воздымания поднятия Менделеева. В среднем эоцене в Северо-Чукотском бассейне происходит резкое отступление бровки шельфа на 500 км на юг, что свидетельствует о резком и стремительном увеличении уровня моря.

Таким образом, стремительный подъем уровня моря (рис. 2) и возобновление вертикальных тектонических движений приводит к полному прекращению карбонатной седиментации в среднем эоцене (45 млн. лет назад). Со среднего эоцена в пределах изучаемой территории повсеместно развиты глубоководные осадки. Карбонатные постройки перекрывает толща осадков, образующая так называемые «складки облекания» или «drape fold», характерные для глубоководных обстановок. Так же, в осадках моложе среднего эоцена у склонов поднятий повсеместно идентифицируются глубоководные комплексы MTD.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ (грант 24-17-

00020).

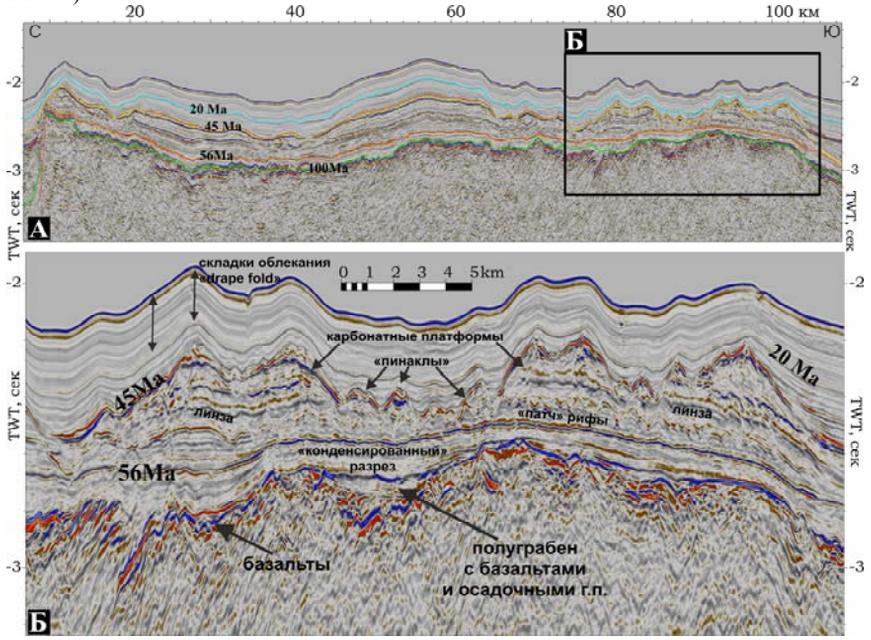


Рис. 1. А. Временной сейсмический профиль ARC20-24 с изображением гипотетических карбонатных построек – карбонатных платформ, пинаклов и патч-риффов. Б. Вырезка крупным планом с изображением различной морфологии карбонатных построек.

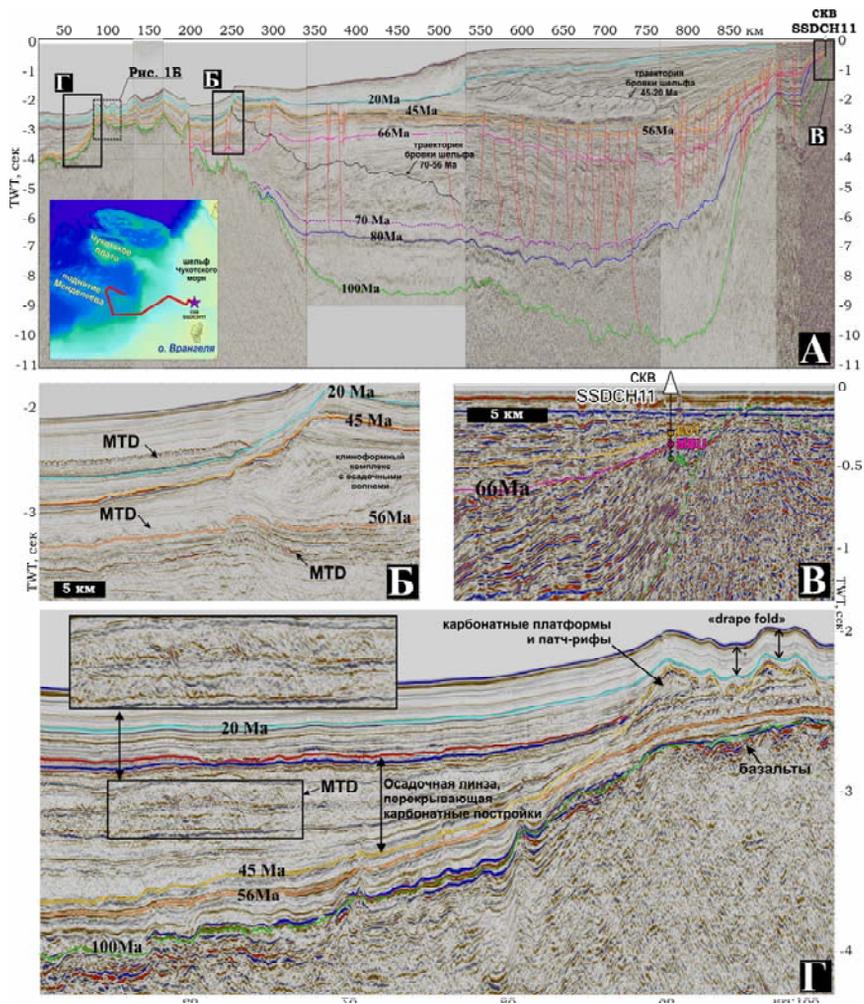


Рис. 2. А. Сейсмический временной профиль, проходящий через поднятие Менделеева и Северо-Чукотский бассейн. Б. Вырезка, иллюстрирующая дистальное положение нижнего клиноформного комплекса. В период с палеоцена по ранний эоцен в пределах изучаемой территории фиксируется самый низкий уровень моря за период с 70 Ма. В конце раннего эоцена начинается трансгрессия. В. Привязка сейсмических горизонтов к скважине SSDCH11 [1]. Г. Осадочная линза, перекрывающая карбонатные постройки. Внутри осадочной линзы глубоководные идентифицируются комплексы MTD. Наклон сбросов внутри комплексов MTD свидетельствует в пользу возобновления воздымания поднятия Менделеева после среднего эоцена.

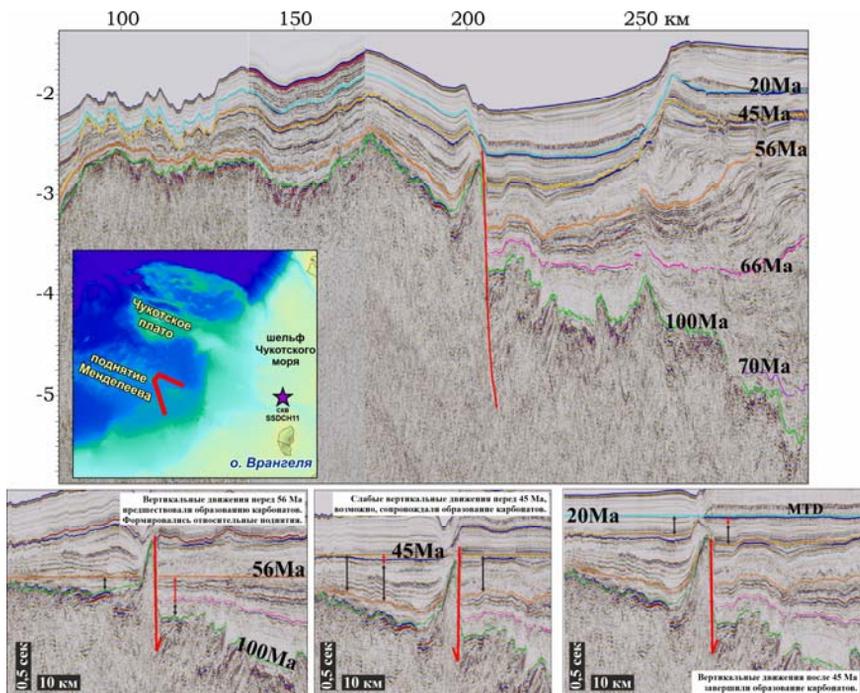


Рис. 3. Вырезка из композитного профиля для поднятия Менделеева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальшев Н.А., Вержбицкий В.Е. и др. Технологические аспекты и опыт стратиграфического бурения в морях российской Арктики // Геология нефти и газа. № 3. 2024. С. 19–30. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-3-19-30
2. Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A. et al. Tectonic evolution of the Amerasia Basin, Arctic Ocean // Gondwana Research. 2025. V. 146. P. 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.06.005>
3. Posamentier H.W., Nikishin A.M., Aleshina K.F. et al. Carbonate deposition in the Arctic during the Paleocene Eocene Thermal Maximum (PETM) and Early Eocene Climatic Optimum (EECO) // Gondwana Research. 2025. V. 139. Doi: 10.1016/j.gr.2024.11.011.

In the Paleocene-Eocene time, carbonate buildups are formed on the bathymetric highs of the Mendeleev Rise. The time of formation of the Paleocene-Eocene carbonate deposits corresponds on a relatively calm tectonic regime and at the lowest sea level in the period since 70 Ma. A rapid sea-level rise and the resumption of vertical tectonic movements led to the complete cessation of carbonate sedimentation in the Middle Eocene.

Рубан А.С.¹, Дударев О.В.²

(¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: ruban@tpu.ru; ²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток)

Изотопный состав серы аутигенного пирита моря

Лаптевых: влияние разгрузки метана

Ruban A.S.¹, Dudarev O.V.²

(¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk; ²Pacific Oceanological Institute of Far East Branch of RAS, Vladivostok)

Sulfur isotopic composition of authigenic pyrite from the

Laptev Sea: influence of methane seepage

Ключевые слова: пирит, изотопы серы, метановые сипы, анаэробное окисление метана, море Лаптевых.

Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите варьируют в узком диапазоне (от -35.6% до -28.1% V-CDT). Подобные значения указывают на обеднение пирита тяжелым изотопом серы, что не свойственно сульфидам, формирующимся в условиях просачивания метана. Вероятно, это обусловлено образованием пирита в «открытой системе» при неглубоком залегании сульфат-метановой транзитной зоны.

Пирит считается важнейшим сульфидом железа, с точки зрения изучения условий раннего диагенеза, благодаря его высокой диагенетической стабильности [1]. Образование пирита в морских осадочных системах происходит при взаимодействии сероводорода, продуцируемого в результате микробного восстановления сульфата морской воды, с ионами двухвалентного железа (Fe^{2+}). В типичных морских условиях основным механизмом образования сульфидов железа является органокластическая сульфатредукция. Однако, в условиях холодного просачивания метаносодержащих флюидов (метановые сипы), а также в гидротермальных средах, органокластическая сульфатредукция играет значительно меньшую роль в формировании сульфидной минерализации.

Ключевым биогеохимическим процессом в холодных просачиваниях является анаэробное окисление метана (АОМ), которое потребляет как восходящий метан, так и нисходящий сульфат морской воды [2, 3]. При достаточных концентрациях в поровой воде растворенных сероводорода и железа происходит осаждение метастабильных моносульфидов или полисульфидов железа (например, макинавит и грейгит, соответственно), которые впоследствии переходят в пирит [4, 5]. Таким образом, аутигенные сульфиды железа наряду с метан-производными карбонатами являются важным свидетельством просачивания метана в морских системах [6–8].

Изученные образцы пирит-содержащих донных осадков и аутигенных карбонатов были отобраны с двух участков активной разгрузки метан-

содержащих флюидов в море Лаптевых. Один из них расположен в пределах внешнего шельфа, второй – на континентальном склоне. Изучение морфологии и размера пирита выполнялась на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 SBU, оборудованного детектором OXFORD X-Max 50 для рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа. Изотопный анализ серы выполнен в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена локальным лазерным методом с использованием фемтосекундного комплекса лазерной абляции NWR Femto. Соотношение изотопов серы измерялось на массах 127 ($^{32}\text{SF}^{5+}$) и 129 ($^{34}\text{SF}^{5+}$) на масс-спектрометре MAT-253 (Thermo Fisher Scientific, Germany).

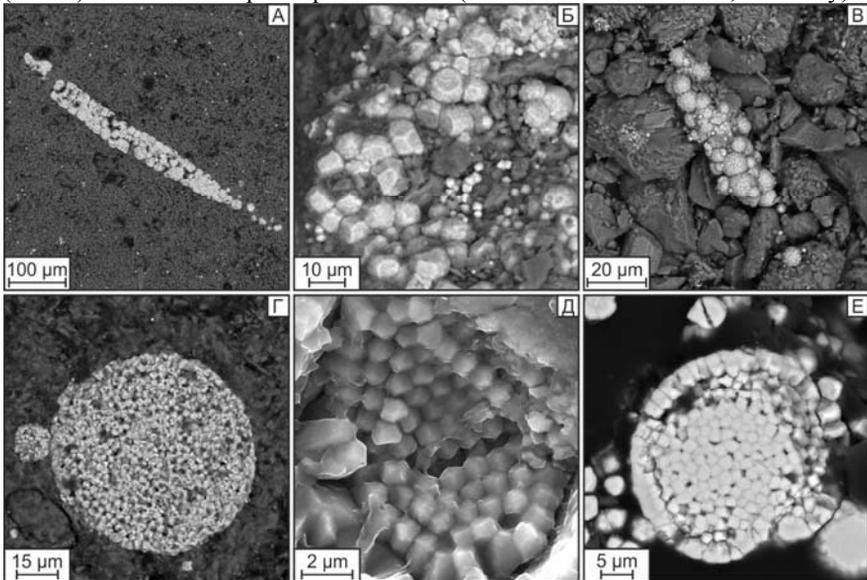


Рис. 1. СЭМ-снимки различных текстурных форм аутигенного пирита: (А) – сцементированный Mg-кальцитом стержневидный агрегат пирит; (Б) скопление полигональных фрамбидов в карбонатной корке; (В) фрамбoidalный кластер; (Г) сферический фрамбoid пирита, сцементированный Mg-кальцитом; (Д) фрамбoidalное ядро, сложенное упорядоченными микрокристаллами пирита; (Е) вторичная корка гипидиоморфных кристаллов пирита, развивающаяся по поверхности фрамбoidalного ядра.

Главным образом аутигенный пирит встречается в виде сферических и полигональных фрамбидов и их кластеров, "sunflower" и стержневидных агрегатов (рис. 1). Текстуры взаимоотношения между агрегатами пирита и карбонатным цементом отражают множественные эпизоды формирования

пирита, вызванные, по-видимому, эпизодическими колебаниями интенсивности просачивания метан-содержащего флюида. Полигональные фрамбоиды в стержневидных агрегатах и карбонатных корках сформировались за счет деформации сферических фрамбоидов в условиях ограниченного пространства для роста и не являются результатом текстурной эволюции пирита.

- Внешний шельф
- Континентальный склон

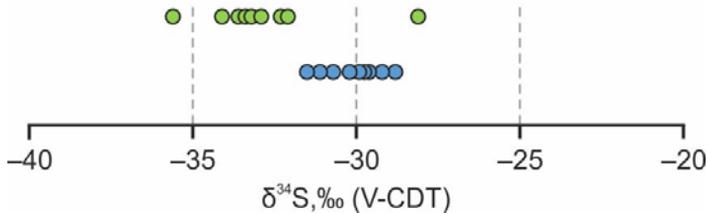


Рис. 2. Изотопный состав серы изученного аутигенного пирита моря Лаптевых

Ассоциация пирита с метан-производными карбонатами, а характерная морфология его агрегатов указывают на то, что сульфат-управляемое анаэробное окисление метана играет доминирующую роль в формировании сульфидов железа на исследуемых участках. Несмотря на это, диаметр большей части измеренных фрамбоидов не превышает 20 мкм, что может отражать непродолжительный период существования благоприятных условий для формирования пирита, а последующее изменение среды аутигенеза способствовало зарастанию фрамбоидов вторичными наростами.

Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите изменяются в достаточно узком диапазоне (от -35.6‰ до -28.1‰ V-CDT), но наблюдается некоторая дифференциация изотопного состава в зависимости от участка (рис. 2). Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите с внешнего шельфа за исключением одного измерения (-28.1‰ V-CDT) варьируют между -35.6‰ и -32.1‰ V-CDT, тогда как в образцах с континентального склона $\delta^{34}\text{S}$ изменяется в пределах от -28.8‰ до -31.5‰ V-CDT.

Полученные результаты отражает обеднение изученного пирита тяжелым изотопом серы, что не является характерным для сульфидов, образующихся в условиях просачивания метан-содержащих флюидов [4, 6]. Это может быть связано с его формированием в открытой системе из-за приповерхностного расположения сульфат-метановой транзитной зоны. По-видимому, локальные условия анаэробного окисления метана, в частности глубина залегания сульфат-метановой транзитной зоны, оказывают существенное влияние на изотопный состав серы пирита.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-77-10002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berner R.A. Sedimentary pyrite formation: An update // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1984. V. 48. P. 605–615.
2. Hinrichs K.U., Boetius A. The Anaerobic Oxidation of Methane: New Insights in Microbial Ecology and Biogeochemistry. In: Wefer, G., Billett, D., Hebbeln, D., Jørgensen, B.B., Schlüter, M., van Weering, T.C.E. (eds) *Ocean Margin Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2002. P. 457-477.
3. Orphan V.J., Hinrichs K.U., Ussler W., Paull C.K., Taylor L.T., Sylva S.P., Hayes J.M., Delong E.F. Comparative Analysis of Methane-Oxidizing Archaea and Sulfate-Reducing Bacteria in Anoxic Marine Sediments // *Applied and Environmental Microbiology*. 2001. V. 67. P. 1922–1934.
4. Neretin L.N., Böttcher M.E., Jørgensen B.B., Volkov I.I., Lüschen H., Hilgenfeldt K. Pyritization processes and greigite formation in the advancing sulfidization front in the upper Pleistocene sediments of the Black Sea // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2004. V. 68. P. 2081–2093.
5. Ohfuji H., Rickard D. Experimental syntheses of frambooids—a review // *Earth-Science Reviews*. 2005. V. 71. P. 147–170.
6. Dantas R.C., Hassan M.B., Cruz F.W., Jovane L. Evidence for methane seepage in South Atlantic from the occurrence of authigenic gypsum and frambooidal pyrite in deep-sea sediments // *Marine and Petroleum Geology*. 2022. V. 142. 105727.
7. Lin Z., Sun X., Peckmann J., Lu Y., Xu L., Strauss H., Zhou H., Gong J., Lu H., Teichert B.M.A. How sulfate-driven anaerobic oxidation of methane affects the sulfur isotopic composition of pyrite: A SIMS study from the South China Sea // *Chemical Geology*. 2016. V. 440. P. 26–41.
8. Pierre C. Origin of the authigenic gypsum and pyrite from active methane seeps of the southwest African Margin // *Chemical Geology*. 2017. V. 449. P. 158–164.

$\delta^{34}\text{S}$ values in pyrite fall within a narrow range (–35.6‰ to –28.1‰ V-CDT). These values reflect a depletion in the heavy sulfur isotope, which is atypical for sulfides formed in association with methane seepage. This feature is most likely linked to pyrite formation in an open system, controlled by the near-surface position of the sulfate–methane transition zone.

Русаков В.Ю.^{1,2}, Кузьмина Т.Г.¹, Лукманов Р.А.¹

(¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва, e-mail: rusakov@geokhi.ru; ²Научно-технологический университет “Сириус”, Международный научный центр в области экологии и вопросов изменения климата, Федеральная территория Сириус”)

Скорости аккумуляции донных осадков Карского моря и моря Лаптевых

Rusakov V.Y.^{1,2}, Kuz'mina T.G.¹, Lukmanov R.A.¹

(¹Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow; ²Sirius University of Science and Technology, International Scientific Center in the Field of Ecology and Climate Change Issues, Federal territory Sirius)

Sediment accumulation rates of the Kara and Laptev Seas

Ключевые слова: 210-Pb, скорости накопления абсолютных масс, бюджет донных осадков, Карское море, море Лаптевых

В данном исследовании мы оцениваем скорости накопления абсолютных масс осадочного материала в обширных шельфовых арктических морях — Карском и Лаптевых — за последние 100 лет на основе датирования с помощью 210-Pb с использованием модели RUS2023. Результаты показали, что скорости накопления абсолютных масс в Обской губе и Енисейском заливе составляют 1.37 и 1.4 г/см²/год соответственно. Аналогичные величины в желобах Новой Земли, Воронина и Садко составляют 1.46, 0.82 и 1.99 г/см²/год соответственно, а во внутреннем и внешнем шельфе моря Лаптевых составляют 1.26 и 0.72 г/см²/год соответственно. Эти значения как минимум в десять раз превышают ранее оцененные значения, полученные с использованием датирования AMS 14-C за последние несколько тысяч лет. Беспрецедентный рост скоростей накопления осадочного материала за последние 100 лет может быть обусловлен ускоренной береговой эрозией и эрозией почв в водосборах сибирских рек, расположенных в зоне вечной мерзлоты.

Как известно, наиболее резкие изменения климата и их природные последствия наблюдаются в высоких широтах [например, 1], характеризующихся значительными сезонными колебаниями температуры. Особенно ярко эти изменения проявились в зоне вечной мерзлоты и прилегающих к ней морях. Кульминацией последних климатических изменений стал период современного потепления, наблюдаемый с 1900 г. н.э. [2, 3]. Ярким примером служит увеличение речного стока [4–6] и более интенсивное отступление береговой линии, состоящей из нелитифицированных прибрежных участков, включающих вечную мерзлоту [7]. Наши предыдущие исследования [8] показали значительные краткосрочные изменения скорости осадконакопления и скорости накопления абсолютных масс (СНАМ) различных гранулометрических фракций донных осадков на Арктическом шельфе за последние 100 лет. Однако влияние этих изменений на баланс донных осадков шельфовых морей остается неоднозначным [9].

Представленные в настоящем исследовании данные были собраны в ходе трех экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш» с 2018 по 2020 гг. (73-й, 78-й и 82-й рейсы). Результаты радиоизотопного (^{210}Pb и ^{137}Cs) и гранулометрического анализов были опубликованы в работах Русакова и Борисова [8] и Русакова и др. [10, 11]. Здесь представлены новые данные по аккумуляции донных осадков в Карском море и море Лаптевых (рисунок и таблица).

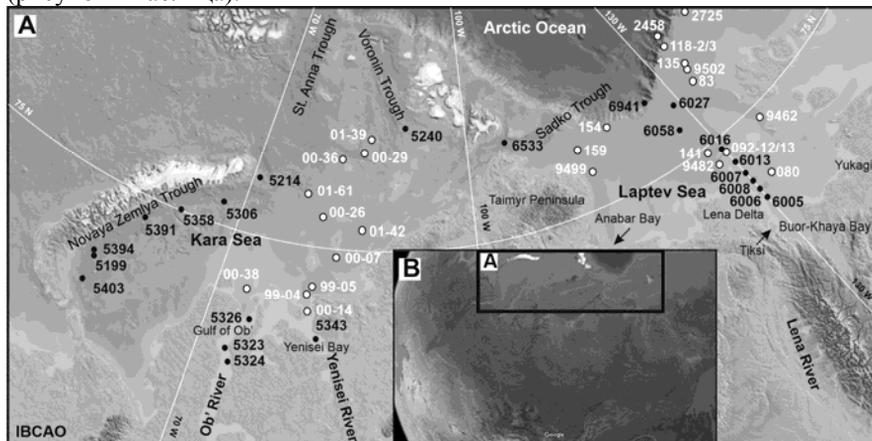


Рисунок. А – Район исследования с указанием точек отбора колонок донных осадков. Черным цветом обозначены колонки, датированные с помощью ^{210}Pb ; белым цветом обозначены колонки, датированные с помощью AMS 14-C. В – Изображение Сибири со спутника.

В данной работе для пересчета избыточной активности ^{210}Pb в календарные года использована новая модель RUS2023 (<http://www.geokhi.ru/DocLevML> или скачать архив с программой и инструкцией http://www.geokhi.ru/DocLevML/Rus2023_v2.zip [10]), являющаяся вариацией модели постоянной начальной концентрации (С1) [12]. Эта модель позволила датировать современные отложения, накапливавшиеся в условиях эрозионно-аккумулятивного осадконакопления, с учетом их гранулометрического состава и сорбционной емкости.

Исследования показали высокую временную изменчивость ШАМ в масштабе до нескольких десятилетий (характерная особенность эрозионно-аккумулятивного осадконакопления на шельфе) и ее тесную связь с изменениями окружающей среды. В связи с этим ШАМ является одним из важных инструментов для реконструкций изменения климата. Кроме того, этот показатель играет ключевую роль в оценке бюджета осадков. Последний контролируется изменением климата и пространственно-временной изменчивостью поступления осадочного материала в бассейн

седиментации.

Таблица. Площади районов исследований, скорости накопления абсолютных масс (СНАМ, т/км²/год) и скорости аккумуляции донных осадков (СА, 10⁶ т/год), рассчитанные с использованием ²¹⁰Pb (модель RUS2023 [10]) и AMS ¹⁴C.

Район	км ²	СНАМ, ²¹⁰ Pb	СНАМ, ¹⁴ C	СА, ²¹⁰ Pb	СА, ¹⁴ C
Обская губа	44 500	13 700	920	609	40.9
Енисейский залив	20 000	14 000	600	280	12
Шельф КМ*	385 000	–	520	–	200
НЗ желоб	53 900	14 600	–	787	–
Желоб Воронина	25 000	8 200	–	205	–
Желоб Садко	20 000	19 900	–	398	–
Внутр. шельф МЛ	300 000	12 600	710	3 780	213
Внеш. шельф МЛ	300 000	7 200	370	2 160	111
Конт. склон МЛ	24 000	5 200	290	125	6.9

* исключая желоба, НЗ – Новоземельский, КМ – Карское море, МЛ – море Лаптевых.

Климатический фактор обусловлен резким повышением температуры поверхности Земли в результате потепления в Северном полушарии (Современного потепления) с начала (?) прошлого века. Это привело к более интенсивной деградации вечной мерзлоты на огромных территориях водосборов сибирских рек и, как следствие, к усилению береговой и почвенной эрозии.

Пространственный фактор определяется рельефом дна, придонными течениями и расстоянием до источников питания. Высокая пространственная неоднородность СНАМ обусловлена наличием протяженных эстуариев таких рек, как Обь, Енисей и Хатанга, а также глубоководных желобов, таких как Новоземельский, Святой Анны, Воронина и Садко. СНАМ в этих районах в несколько раз выше, чем в мелководных зонах внутреннего и внешнего шельфа.

Временной фактор во многом является следствием климатического фактора. Усиление волнения вследствие увеличения безледового периода и морских течений вследствие ускорения арктического гидрологического цикла не привело к уменьшению СНАМ а, наоборот, к ее увеличению. Влияние волнения и морских течений на осадконакопление проявилось лишь в перераспределении осадков в пределах самого шельфа и привело к усилению их переноса с внутреннего шельфа на внешний.

Авторы выражают глубокую благодарность экипажу НИС «Академик

Мстислав Келдыш» и руководителям экспедиции – академику Игорю Павловичу Семилетову и доктору геолого-минералогических наук Олегу Викторовичу Дудареву – за оказанную помощь в получении научного материала. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН) и поддержана Российским научным фондом (грант № 24-17-20030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Groisman P., Soja A. Northern Hemisphere high latitude climate and environmental change // *Environ. Res. Lett.* 2007. V. 2. P. 045008.
2. Kaufman D.S., Schneider D.P., McKay N.P. et al. Arctic Lakes 2k Project Members. Recent warming reverses long term Arctic cooling // *Science*. 2009. V. 325. P. 1236–1239.
3. PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia // *Nat. Geosci.* 2013. V. 6. P. 339–346.
4. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W. et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science*. 2002. V. 298. P. 2171–2173.
5. Syvitski J.P.M., Vörösmartry C.J., Kettner A.J., Green P. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the Global Ocean // *Science*. 2005. V. 308. P. 376–380.
6. Chalov S., Prokopeva K., Magritsky D. et al. Climate change impacts on streamflow, sediment load and carbon fluxes in the Lena River delta // *Ecol. Indic.* 2023. V. 157. P. 111252.
7. Lantuit H., Overduin P.P., Couture N. 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.
8. Rusakov V.Y., Borisov A.P. Sedimentation on the Siberian Arctic Shelf as an indicator of the Arctic hydrological cycle // *Anthropocene*. 2023. V. 41. P. 100370.
9. Rusakov V.Y., Kuz'mina T.G., Lukmanov R.A. Assessment of the sediment budget of the Kara and Laptev seas // *Cont. Shelf Res.* 2025. V. 292. P. 105506.
10. Rusakov V.Y., Lukmanov R.A., Savin A.S. About fluctuations in the excess ²¹⁰Pb flux into the East Siberian Arctic Shelf sediments, the Laptev Sea // *J. Environ. Radioact.* 2024. V. 273. P. 107387.
11. Rusakov V.Y., Lukmanov R.A., Soktoev B.R., Mishan'kin A.Y. Echoes of a Cold War // *Cont. Shelf Res.* 2024. V. 283. P. 105374.
12. Goldberg E.D. Geochronology with Pb-210 // *Proceedings of a Symposium of Radioactive Dating*. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1963. P. 121–131.

In this study, we evaluate sediment mass accumulation rates (MAR) in the extensive coastal Arctic seas, the Kara and Laptev seas, over the past 100 years based on ²¹⁰Pb

dating with the RUS2023 model. Our results showed that MARs in the Gulf of Ob' and Yenisei Bay are 1.37 and 1.4 g cm⁻² yr⁻¹ respectively. MARs in the Novaya Zemlya, Voronin and Sadko troughs are 1.46, 0.82 and 1.99 g cm⁻² yr⁻¹ respectively. MARs in the inner and outer Laptev Sea shelf are 1.26 and 0.72 g cm⁻² yr⁻¹ respectively. These values are at least ten times higher than previously estimated values obtained using AMS 14-C dating over the past few thousand years. The unprecedented increase in the total mass sediment accumulation over the past 100 years may be due to accelerated coastal erosion and soil erosion in the Siberian River catchments, located in the permafrost zone.

Силантьев С.А.

(Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского, г. Москва,
e-mail: silantyev@geokhi.ru)

Неоген-четвертичная активизация большой магматической провинции HALIP: пример архипелага Де Лонга, Восточная Арктика

Silantyev S.A.

(Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow)

Neogene-Quaternary magmatic events in HALIP: Example of De Long Archipelago, Eastern Arctic

Ключевые слова: внутриплитный магматизм, мантийный плюм, континентальный шельф

Острова Жохова и Вилькицкого расположены в восточной акватории Арктического бассейна и относятся к архипелагу Де Лонга, в центральной части которого установлены проявления внутри-плитного магматизма, связанного, возможно, с молодым (0.4 млн. лет) мантийным плюмом. Ассоциация щелочных базальтов и выносимых ими мантийных ксенолитов, установленная на о-ве Жохова, в петрографическом и геохимическом отношениях очень напоминает аналогичный и одновозрастный с ней комплекс пород, распространенных в северо-западной части архипелага Шпицберген. Возможно, на значительной площади Арктического бассейна в пределах крупной магматической провинции HALIP устанавливаются признаки активизации молодого внутри-плитного магматизма, способствующего транспорту к поверхности вещества метасоматизированной малоглубинной мантии.

Материалом проведенного исследования послужили образцы щелочных оливиновых базальтов, лимбургитов и шпинелевых лерцолитов, собранных на о-вах Жохова и Вилькицкого во время двух полевых сезонов, которые проводились в 1986 и 1988 гг. в рамках совместной высокоширотной экспедиции ИО АН СССР и ГЕОХИ АН СССР. Архипелаг де Лонга, согласно [1], относится к крупной магматической провинции HALIP (High Arctic Large Igneous Province), включающей меловые магматические комплексы островов Арктического бассейна и арктической Канады. Результаты полевых наблюдений показали, что о. Жохова, расположенный в центральной части архипелага Де Лонга, целиком сложен лавовыми покровами оливин-порфировых базальтов. В центральной, наиболее возвышенной части о-ва Жохова распространены вулканические породы, представленные черными, красноватыми и ярко рыжими разновидностями, с признаками взрывного происхождения: обилие вулканического шлака и фрагменты вулканических бомб. На меньшем по размеру о-ве Вилькицкого также распространены щелочные эффузивные породы, геохимические особенности которых позволяют относить их к лимбургитам. Во всех разновидностях изученных вулканических пород

присутствуют мелкие (размером не более 2х3х5 см) мантийные ксенолиты, представленные шпинелевыми лерцолитами. Эти породы, являющиеся наиболее северным проявлением мантийного вещества в восточном секторе Азии, представляют древний (1.1 млрд. лет) мантийный субстрат, обнаруживающий геохимические признаки неистощенной мантии: $(La/Sm)_{cn} = 2.38$; $Sm/Nd = 0.217$) [2]. Оценка условий образования минеральных парагенезисов, характерных для шпинелевых лерцолитов архипелага Де Лонга, предпринятая в [2], позволяет наметить траекторию подъема магматического расплава оливиновых щелочных базальтов и определить уровни мантии, на которых захватывались мантийные ксенолиты: 60 км (21 кбар) – 50 км (16 кбар) – 45 км (15 кбар). Кроме мантийных ксенолитов, в вулканических породах архипелага Де Лонга присутствуют также ксенолиты корового происхождения: долериты, гранито-гнейсы, кварциты. Долериты, относящиеся к группе коровых ксенолитов, судя по их возрасту и составу, являются продуктами магматизма, характерным для провинции HALIP. Неопротерозойский возраст гранито-гнейсов из коровых ксенолитов соответствует возрасту фундамента арктической акватории Чукотки и о-ва Врангеля, что может свидетельствовать об участии этих гранитоидов в строении корового разреза западного сектора континентального шельфа Восточно-Сибирского моря [3].

Приведенные выше данные о составе и строении о-ов Жохова и Вилькицкого позволили реконструировать возможный разрез литосферы в акватории Арктического бассейна, к которой относится центральная часть архипелага Де Лонга [4]. В пользу правдоподобности строения разреза, представленного на рис. 1, свидетельствует литологический состав ксенолитов в щелочных базальтах и данные, приведенные в [2–7]. Неогеновый внутриплитный вулканизм о-ов архипелага Де Лонга обладает изотопно-геохимическими чертами, свойственными продуктам плюмового магматизма. Первые проявления этого магматизма в рассматриваемой акватории Арктического бассейна установлены на о-ве Жохова 5.62 млн лет, а более поздние – на о-ве Вилькицкого 0.4 млн лет.

Ассоциация щелочных базальтов и выносимых ими мантийных ксенолитов, установленная на о-вах Жохова и Вилькицкого, в петрографическом и геохимическом отношении очень напоминает аналогичный и одновозрастный с ней комплекс пород, распространенных в северо-западной части архипелага Шпицберген, расположенного в 2800 км к западу от островов Де Лонга, в западном секторе континентального шельфа Арктического бассейна. Оба островных архипелага по существу представляющим относятся к крупной магматической провинции HALIP (например, [1]). Архипелаг Шпицберген, как и архипелаг Де Лонга, расположен на внешней границе общего для них континентального шельфа, по соседству с срединно-океаническим хребтом:

Арктический срединно-океанический хребт и хр. Гаккеля соответственно. Три четвертичных вулканических центра Шпицбергена (Сверрефьелл, Сигурдфьелл, Хальвданпигген), образованных в результате инициации в этом регионе активного внутриплитного магматизма, выносят к поверхности ксенолиты мантийных лерцолитов и нижнекоровых пород [8, 9].

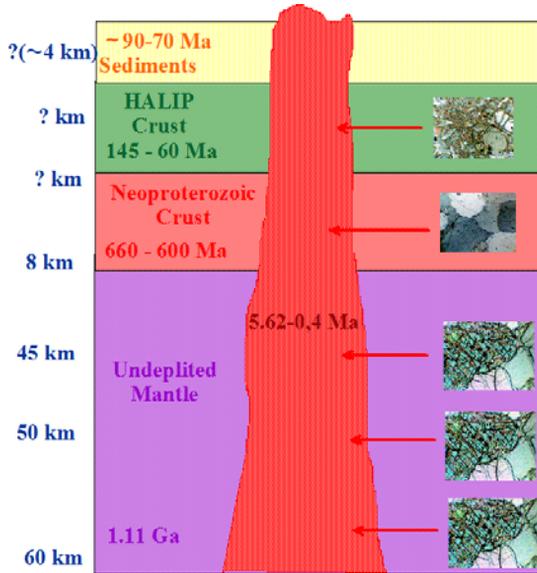


Рис. 1. Идеализированный разрез литосферы под центральной частью архипелага Де Лонга с поднимающейся колонной магматического расплава плюмового типа. В построении разреза были использованы данные [2–7].

Геохимические особенности вулканических пород архипелагов Де Лонга и Шпицберген, также как имеющиеся данные об их изотопном составе, указывают на их связь с проявлениями внутриплитного магматизма, индуцированного мантийным плюмом. Щелочные базальты архипелагов Шпицберген и Де Лонга обнаруживают практически одинаковый возраст: 1.61–0.86 млн. лет и 2.96–0.4 млн. лет соответственно [2, 9].

Таким образом, можно предполагать, что плюмовый магматизм спровоцировал магматическую активизацию Арктической пассивной континентальной окраины России одновременно на ее западном и восточном флангах (рис. 2). Возможно, на значительной площади Арктического бассейна в пределах крупной магматической провинции HALIP устанавливаются признаки активизации молодого внутриплитного магматизма, способствующего транспорту к поверхности вещества метасоматизированной малоглубинной мантии.

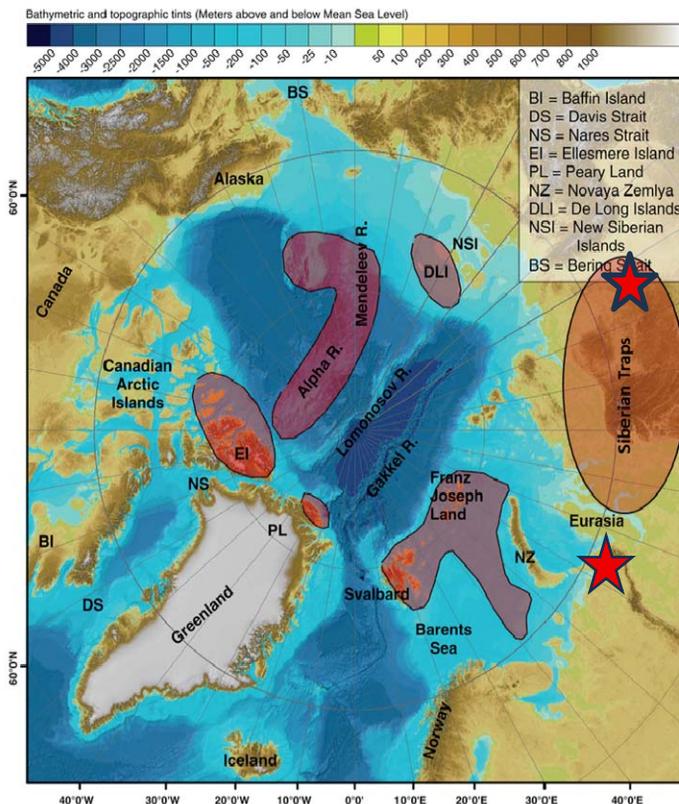


Рис. 2. Два возможных полюса активизации магматической провинции HALIP, расположенных на восточном фланге Арктического шельфа России (архипелаг Де Лонга) и на его западном фланге (архипелаг Шпицберген). Карта заимствована из [1].

Настоящее исследование осуществлялось за счет средств, выделяемых из бюджета на исследования в рамках госзадания ГЕОХИ РАН, ведущиеся по теме «Процессы, контролирующие образование и эволюцию литосферы Земли».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gaina C., Medvedev S., Torsvik T.H. et al. 4D Arctic: A Glimpse into the Structure and Evolution of the Arctic in the Light of New Geophysical Maps, Plate Tectonics and Tomographic Models // *Surv Geophys.* 2014. V. 35. P. 1095–1122. DOI 10.1007/s10712-013-9254-y
- Silant'ev S.A., Bogdanovskii O.G., Fedorov P.I. et al. Intraplate magmatism of

the De Long Islands: A response to the propagation of the ultraslow-spreading Gakkel Ridge into the passive continental margin in the Laptev Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2004. V. 6. № 3. P. 1–31.

3. Akinin V.V., Gottlieb E.S., Miller E.I. et al. Age and composition of basement beneath the De Long archipelago, Arctic Russia, based on zircon U–Pb geochronology and O–Hf isotopic systematics from crustal xenoliths in basalts of Zhokhov Island // *Arktos*. 2015. V. 1. № 9. DOI 10.1007/s41063-015-0016-6.

4. Silant'ev S. Neogene within plate magmatism of De Long Islands: Footprint of young mantle plume of the Eastern Arctic Basin // 7-th International Science Conference. Large Igneous Province. Tomsk, Russia. 2019. P. 128–129.

5. Franke D., Hinz K., Reichert C. Geology of the East Siberian Sea, Russian Arctic, from seismic images: Structures, evolution, and implications for the evolution of the Arctic Ocean Basin // *J. of Geophys. Res.* 2004. V. 109. B07106. doi:10.1029/2003JB002687.

6. Franke D., Hinz K. Geology of the shelves surrounding the New Siberian Islands, Russian Arctic // *Stephan Mueller Spec. Publ. Ser.* 4. 2009. P. 35–44. www.stephan-mueller-spec-publ-ser.net/4/35/2009/

7. Thorarinsson S.B., Holm P.M., Tappe S. et al. Late Cretaceous–Palaeocene continental rifting in the High Arctic: U–Pb geochronology of the Kap Washington Group volcanic sequence, North Greenland // *J. of Geol. Soc. London*. 2011. V. 168. P. 1093–1106. doi: 10.1144/0016-76492011-018.

8. Skjeltkvale B.-L., Amundsen H.E.F., O'Reilly S.Y. et al. A primitive alkali basaltic stratovolcano and associated eruptive centers, Northwestern Spitsbergen: Volcanology and tectonic significance // *J. of Volcanology and Geothermal research*. 1989. V. 37. P. 1–19.

9. Treiman A.H. Eruption age of the Sverrefjellet volcano, Spitsbergen Island, Norway // *Polar Research*. 2012. V. 31. 17320.

Zhokhov and Vilkitsky Islands are located in the eastern Arctic Basin and belong to the De Long Archipelago, whose central part has been identified as exhibiting intraplate magmatism, possibly associated with a young (0.4 million years) mantle plume. The alkaline basalt assemblage and the mantle xenoliths they transport, identified on Zhokhov Island, is petrographically and geochemically very similar to a coeval rock complex found in the northwestern Spitsbergen archipelago. Signs of active young intraplate magmatism, facilitating the transport of metasomatized shallow mantle material to the surface, are likely present across a significant area of the Arctic Basin within the HALIP large igneous province.

**Сломнюк С.В.¹, Новичкова Е.А.¹, Якимова К.С.¹,
Матуль А.Г.¹, Кравчишина М.Д.¹, Мохан Р.², Тивари М.²**

(¹Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, г. Москва. e-mail:

slomnyuk.sv@ocean.ru, ²Национальный центр полярных и океанических исследований, Васко-да-Гама, Индия)

Изменения скоростей осадконакопления осадков района контуритового дрефта (юго-западная часть Карского моря) в голоцене

Slomnyuk S.V.¹, Novichkova E.A.¹, Yakimova K.S.¹,

Matul A.G.¹, Kravchishina M.D.¹, Mohan R.², Tiwari M.²

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ²National Centre for Polar and Ocean Research, Vasco da Gama, Goa, India)

The sedimentation rate changes in the contoured drift deposits (southwestern Kara Sea) during the Holocene

Ключевые слова: радиоуглеродное датирование, контуритовый дрефт, Карское море

Представлены результаты исследования скоростей осадконакопления района контуритового дрефта из субмеридиональной депрессии на юго-западе Карского моря. На основе AMS ¹⁴C датирования трех колонок донных осадков установлено закономерное увеличение скоростей седиментации с юга на север по простиранию дрефта (с 5 до 16 см/100 лет соответственно).

Контуритовые дрефты – это осадочные тела на дне океанов и морей, формирующиеся под воздействием постоянных придонных течений преимущественно в районах континентального склона. Тем не менее, существуют разные типы дрефтов, отличающиеся как по своим масштабам, так и по местоположению [1]. Объект наших исследований – контуритовый дрефт, сформированный в узкой субмеридиональной депрессии с глубинами до 240 м, расположенной в юго-западной части Карского моря [2]. Изученная область отличается сложным изрезанным рельефом дна с перепадом глубин от первых десятков до нескольких сот метров. Подобные морфоструктуры сформировались, вероятно, под воздействием приледниковых потоков во время разрушения купола ледника в позднем плейстоцене [3].

Согласно нашим данным, дрефт сложен пелитовыми и алевроитопелитовыми осадками, которые по результатам литолого-микропалеонтологического анализа были разделены на три комплекса. Наиболее полный стратиграфический разрез вскрыт в южной части дрефта (колонка АМК-7443), в то время как в его центральной и северной частях (колонки АМК-7444 и 7445 соответственно) отобраны осадки только двух верхних комплексов [4].

По раковинам морских моллюсков в Лаборатории радиоуглеродных

исследований (Познань, Польша) для колонок АМК-7443, 7444 и 7445 сделаны 5 определений абсолютного возраста осадков методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS ^{14}C). Радиоуглеродный возраст осадков был пересчитан в календарный (кал. л.н.) с использованием калибровочной кривой Marine20 [5] и с учетом поправки на локальный резервуарный эффект ($\Delta R = 145 \pm 196$) [6]. Возрастная модель осадков колонок была рассчитана по методу линейной экстраполяции между датированными горизонтами (рис. 1).

Максимальный возраст вскрытых нами осадков составил 13422 кал. л.н. в южной части дрефта (АМК-7443) при мощности осадков 670 см. В центральной части дрефта (колонка АМК-7444, длина 619 см) максимальный возраст опробованных осадков составил 4130 кал. л.н. В северной части дрефта (колонка АМК-7445) осадки мощностью 784 см накопились за 4897 кал. л.

По результатам датирования осадков контуритового дрефта были посчитаны скорости осадконакопления. Средняя скорость осадконакопления по всей вскрытой нами толще осадков составила 12 см/100 лет.

В южной части дрефта (колонка АМК-7443) скорости осадконакопления изменялись в течение конца плейстоцена–голоцена (рис. 1а) от 11 см/100 лет в нижней части колонки (7960–13422 кал. л.н.) до 1.9 см/100 лет в верхней части колонки (0–7960 кал. л.н.). Таким образом, средняя скорость осадконакопления в южной части дрефта составила 5.4 см/100 лет.

В средней части контуритового дрефта (колонка АМК-7444) средняя скорость осадконакопления составила 16 см/100 лет. Скорость осадконакопления менялась (рис. 1б) от 12 см/100 лет в нижней части (1506–4130 кал. л.н.) до 20 см/100 лет в верхней части дрефта (0–1506 кал. л.н.).

На севере контуритового дрефта (колонка АМК-7445) средняя скорость осадконакопления составила 15.6 см/100 лет (рис. 1в).

Таким образом, осадконакопление в районе контуритового дрефта на юго-западе Карского моря изменялось как по простиранию осадочного тела, так и во время его накопления в течение позднего плейстоцена–голоцена. Осадки южной части дрефта (АМК-7443) подвергались эрозии в связи с тем, что придонное течение, формирующее аккумулятивное тело в пределах депрессии, направлено на север. Вероятно, что при размыве отложений в южной части депрессии, осадок далее перемещался на север, где и в настоящее время проходит основная зона разгрузки осадочного материала и накапливается более мощная толща [7].

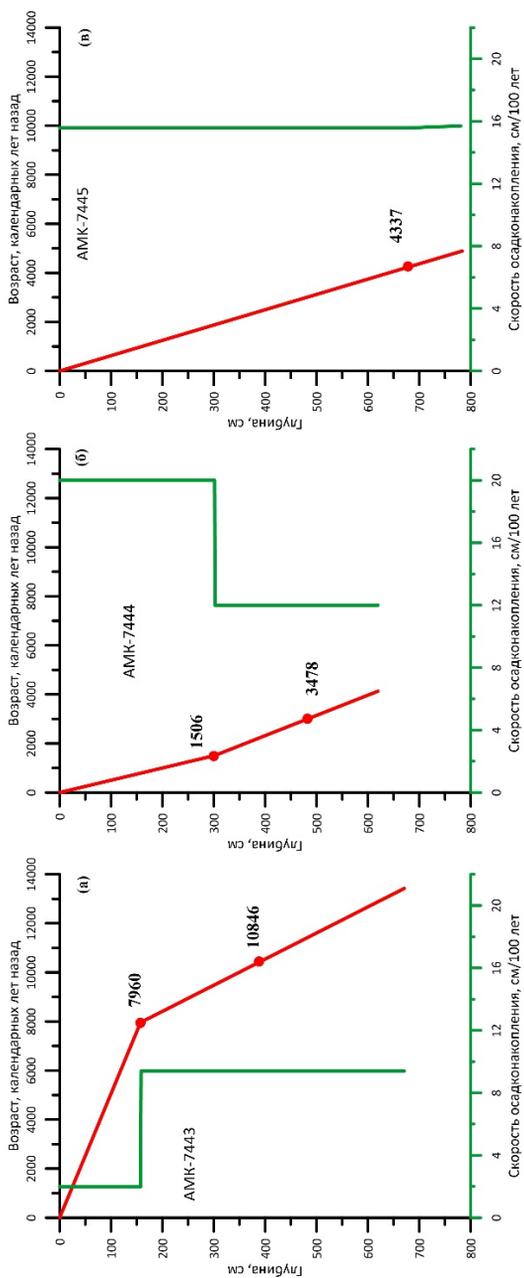


Рис. 1. Модели возраста осадка и скорости осадконакопления в районе контуритового дрифта (колонки AMK-7443 (а), AMK-7444 (б), AMK-7445 (в)).

Таким образом, скорости осадконакопления в конце позднего плейстоцена – начале голоцена (13422 кал. л.н.) в районе исследуемого контуритового дрефта [4] в среднем не превышали 20 см/100 лет. За счет размыва осадков южной части дрефта (колонка АМК-7443), мощность осадочного чехла в данном районе существенно меньше, чем в его средней и северной частях. В голоцене после 7960 кал. л.н. скорость осадконакопления в южной части дрефта уменьшилась до 1.9 см/100 лет, при этом в средней и северной частях скорости седиментации увеличились до 16 см/100 лет.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020). Исследование образцов на радиоуглеродный возраст было выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-17-00044, <https://rscf.ru/project/24-17-00044/>).

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования уникальной научной установки НИС «Академик Мстислав Келдыш» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН», <https://rv.ocean.ru/flot/abf/nis-akademik-mstislav-keldyish>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов Б.В., Амбросимов А.К., Мороз Е.А. и др. Позднечетвертичные контуритовые дрефты на шельфе Карского моря // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 511. С. 236–242.
2. Верба М.Л. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–37.
3. Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. № 11–13. P. 1229–1271.
4. Сломнюк С.В., Баранов Б.В., Новичкова Е.А. и др. Условия формирования мелководного контуритового дрефта в Карском море // Океанология. 2025. Т. 65. № 1. С. 156–168.
5. Reimer P.J., Austin W., Bard E. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon. 2020. V. 62. № 4. P. 725–757.
6. Forman S.L., Polyak L. Radiocarbon content of pre-bomb marine mollusks and variations in the 14C Reservoir age for coastal areas of the Barents and Kara Seas, Russia // Geophysical Research Letters. 1997. V. 24 (8). P. 885–888.
7. Амбросимов А.К. О придонных течениях на рифте в Южно-Карском осадочном бассейне // Материалы Международного Симпозиума Инженерная Экология – 2023 / под ред. Мкртчяна Ф.А. М., 2023. С. 53–56.

The sedimentation rates studied at the contour drift area from a submeridional depression in the southwest of the Kara Sea. Based on AMS ^{14}C dating of three columns of bottom sediments, a regular increase in sedimentation rates from south to north along the drift extension (from 5 to 16 cm/100 years, respectively) has been established.

**Токарев М.Ю.^{1,2}, Терехина Я.Е.², Пирогова А.С.²,
Потемка А.К.^{1,2}, Росляков А.Г.^{2,3}**

(¹Учебно-научный центр ЮНЕСКО-МГУ по морской геологии и геофизике, e-mail: tokarev@oilgascenter.ru, ²Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва)

Технологии сейсмических исследований опасных геологических процессов в Арктике

**Tokarev M.Y.^{1,2}, Terekhina Ya.E.², Pirogova A.S.²,
Potemka A.K.^{1,2}, Roslyakov A.G.^{2,3}**

(¹UNESCO-Lomonosov Moscow State University Educational and Scientific Center for Marine Geology and Geophysics, ²Geological faculty of Lomonosov Moscow State University, ³Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Technologies for seismic research of Arctic geohazards

Ключевые слова: опасные геологические процессы и явления, арктический шельф, сейсмические исследования, морская геофизика.

Для изучения инженерно-геологических условий и идентификации опасных геологических процессов и явлений предложен подход к формированию оптимального программно-аппаратного геофизического комплекса. Рассмотрены результаты исследований с новыми методиками наблюдений: мультислотные, широкополосные двумерные наблюдения, трехмерные сейсмоакустические наблюдения в частотном диапазоне, многоканальный анализ и томография на поверхностных волнах, вертикальное сейсмоакустическое профилирование в малоглубинных морских скважинах с использованием оптоволоконных распределенных акустических датчиков (DAS).

Разработка рассматриваемой технологии сейсмических исследований была выполнена с целью усовершенствования методики идентификации опасных геологических процессов и явлений (ОГПиЯ) и оценки степени риска их проявлений при бурении скважин и возведении объектов нефтегазового комплекса на континентальном шельфе. Полевые исследования и анализ данных выполнялись с использованием авторского программно-аппаратного сейсмоакустического комплекса SplitMultiSeis и специализированной авторской системой обработки данных SeisPro, отвечающими требованиям отраслевых стандартов.

В настоящей работе под геологической опасностью понимается совокупность геологических процессов и явлений, которые могут неблагоприятно воздействовать на человека, инженерные сооружения и окружающую среду. [1, 2]. Под «процессом понимается воздействие, включая факторы, его обуславливающие, а под явлением – результат действия процесса в виде соответствующих новообразований пород и элементов рельефа» [3].

Нами была предложена «инженерно-геофизическая» классификация

ОГПиЯ основанная на требованиях к изучению инженерно-геологических условий (в первую очередь, на требования к глубинности исследований), и условиях проведения работ, (в первую очередь по глубине воды). Позднее этот подход был закреплен в СП 5041325800.2021 [4]

Таблица. Задачи и рекомендуемые геофизические методы для их решений

Задачи	Рекомендуемые методы
Задачи инженерно-геологических изысканий:	
<p>Изучение дна и верхней части грунтового массива на глубину 5–10 м ниже дна моря, геологических и инженерно-геологических процессов:</p> <ul style="list-style-type: none"> - исследование микрорельефа, в т.ч. следов ледовой экзарации; - выявление скоплений крупнообломочных отложений и выходов скальных грунтов; - изучение структуры и свойств донных грунтов; - идентификация опасных геологических процессов и явлений (мест разгрузки флюидов, термокарстовых явлений, гравитационных процессов, разрывных нарушений); - изучение инженерно-геологических процессов для защиты и оценки состояния донной инфраструктуры МНГС; - геотехнический мониторинг на этапе эксплуатации морских сооружений. 	<p>Основные методы приповерхностных исследований:</p> <ul style="list-style-type: none"> - эхолотирование; - гидролокация; - акустическое профилирование (АП); - сейсморазведка ультра или сверхвысокого разрешения (СУВР или ССВР); - непрерывное сейсмоакустическое профилирование в высокочастотной модификации (ВЧ НСП); - морская магнитная съемка (ММС). <p>Вспомогательные:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сейсморазведка с донными многокомпонентными системами (СДМС); - сейсмоакустические наблюдения в скважинах (ВСП, СК); - электроразведка (ЭР).
<p>Изучение грунтового массива на глубину до 50–100 м ниже дна моря, геологических и инженерно-геологических процессов:</p> <ul style="list-style-type: none"> -определение в плане и разрезе геологических границ, обусловленных сменой литологического состава, состоянием (талым, мерзлым) грунтов; - определение кровли скальных 	<p>Основные методы малоглубинных исследований:</p> <ul style="list-style-type: none"> - сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР); - сейсморазведка высокого разрешения (СВР); - непрерывное сейсмоакустическое профилирование в низкочастотной модификации (НЧ НСП).

Задачи	Рекомендуемые методы
<p>(коренных) грунтов; - выявление тектонических нарушений; - идентификация опасных геологических процессов и явлений (газонасыщенных грунтов, выявление каналов миграции газов и иных флюидов, палеоврезов и др.)</p>	<p>Вспомогательные: - сейсморазведка с донными многокомпонентными системами (СДМС); - сейсмоакустические наблюдения в скважинах (ВСП, СК); - морская магнитная съемка (ММС); - электроразведка (ЭР); - термометрия.</p>
<p>Изучение грунтового массива на глубину до 500–1000 м ниже дна моря, геологических процессов: - определение в плане и разрезе геологических и физических границ, обусловленных сменой литологического состава и состоянием грунтов (талым, мерзлым, газонасыщенным); - выявление зон потенциального аномального высокого пластового давления и каналов миграции газов и иных флюидов.</p>	<p>Основные методы глубинных исследований: - сейсморазведка высокого разрешения (СВР); - стандартная сейсморазведка (СР).</p> <p>Вспомогательные: - морская магнитная съемка (ММС); - электроразведка (ЭР).</p>
<p>Исследования для сейсмического микрорайонирования (СМР): - регистрация сейсмических колебаний грунтов площадки (землетрясений и микросейсм) за период проведения инженерных изысканий. - получение пространственного строения грунтовой толщи площадки; - определение скорости распространения продольных и поперечных сейсмических волн, мощности слоев грунтовой толщи; - определение параметра – V_s^{30} средней скорости поперечных волн в верхней 30-метровой грунтовой толще.</p>	<p>Основные методы: - сейсмологические наблюдения в пределах площади изысканий; - непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП); - сейсморазведка сверхвысокого разрешения (ССВР); - сейсморазведка с донными многокомпонентными системами (СДМС); - сейсмоакустические наблюдения в скважинах (ВСП, СК).</p>

Инженерно-геологические задачи и сейсмогеологические условия участков работ определяют требования к составу сейсмических комплексов и параметрам наблюдений. В докладе рассматриваются возможности и ограничения разработанных методик сейсмических исследований, таких, как:

Мультичастотные, широкополосные двумерные наблюдения для синхронных глубинных, малоглубинных и приповерхностных исследований в частотном диапазоне 10–1500 Гц [5];

Трехмерные сейсмоакустические наблюдения в частотном диапазоне 150–1500 Гц [6];

Многоканальный анализ и томография на поверхностных волнах в частотном диапазоне 4–20 [7];

Вертикальное сейсмоакустическое профилирование в малоглубинных морских скважинах с использованием оптоволоконных распределенных акустических датчиков (DAS)[8].

Каждая из рассматриваемых методик наблюдений потребовала разработки новых подходов к обработке и анализу данных, включая динамический анализ и мультичастотную инверсию. Развитие технологий поверхностных и скважинных сейсмических наблюдений, методов обработки и интерпретации данных позволяют надеяться на осуществление перехода от качественного анализа сейсмических изображений к количественной оценке упругих параметров грунтов по сейсмическим данным. Предложенный подход не только повышает достоверность идентификации ОГПиЯ, но и создает условия для построения инженерно-геологических (геомеханических) моделей верхней части геологического разреза [9].

Авторы признательны сотрудникам кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета МГУ А.В. Старовойтову, Н.В. Шалаевой, В.Г. Гайнанову, проф. СПбГУ А.Е. Рыбалко, сотрудникам МИП «СПЛИТ» и «Деко-Геофизика СК» и всем, кто помогал в проведении исследований. Работа выполнена при с использованием оборудования приобретенного по программе Развития МГУ имени М.В. Ломоносова в ЦКП "Морская биология и геология" и Разработка программно-аппаратных комплексов для поиска, разведки, геофизического и геохимического мониторинга разработки месторождений углеводородов, в т.ч. в труднодоступных регионах и сложных природно-климатических условиях» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации» (RFMEFI60717X0187).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терминологический словарь по инженерной геологии. М.: Недра, 2012.

2. Геологический словарь (в 3-х т.). СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010.
3. Золотарев Г.С. Инженерная геодинамика. М: Изд-во МГУ, 1983.
4. Богданов М.И. и др. «СП 504.1325800.2021 ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА НА КОНТИНЕНТАЛЬНОМ ШЕЛЬФЕ Общие требования» Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. М., 2021. 168 с.
5. Потемка А.К., Колобакин А.А., Понимаскин А.И. и др. Первые результаты морских широкополосных синхронных сейсмических исследований в Баренцевом море. Контроль качества данных // Геофизика. 2024. № 2. С. 39–47.
6. Бирюков Е.А., Понимаскин А.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. Система для трехмерных сейсмоакустических наблюдений на акваториях – технология работ и обработки данных // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 2. С. 35–41.
7. Половков В.В., Терехина Я.Е., Рахимов Э.А. и др. Методика обработки поверхностных волн, зарегистрированных при сейсморазведочных работах 3D МОВ-ОГТ с буксируемым оборудованием, с целью изучения строения верхней части разреза шельфа Печорского моря // Геофизика. 2024. № 2. С. 52–57.
8. Судакова М.С., Белов М.В., Понимаскин А.О. и др. Особенности обработки данных вертикального сейсмического профилирования морских малоглубинных скважин с волоконно-оптическими распределенными системами // Геофизика. 2021. № 6. С. 111–119.
9. Токарев М.Ю., Пирогова А.С., Локтев А.С. и др. Отчет о НИР «Разработка и апробация модернизированной технологии выявления опасных геологических процессов с оценкой параметров природной среды на тестовом полигоне Арктического шельфа». Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2021 г.

To study engineering-geological conditions and identify hazardous geological processes and phenomena, an approach to the formation of an optimal software and hardware geophysical complex is proposed. The results of studies with new observation methods are considered: multi-frequency, broadband two-dimensional observations, three-dimensional seismoacoustic observations in the frequency range, multi-channel analysis and tomography on surface waves and vertical seismoacoustic profiling in shallow offshore wells using fiber-optic distributed acoustic sensors (DAS).

Уголькова Е.А.¹, Гершелис Е.В.¹, Дударев О.В.², Семилетов И.П.²

(¹Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория «Сириус», ugolkovala@talantiuspeh.ru; ²Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, г. Владивосток)

Особенности геохимического состава донных осадков на шельфе Сибирской Арктики

Ugolkovala E.A.¹, Gershelis E.V.¹, Dudarev O.V.², Semiletov I.P.²

(¹Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory; ²V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Vladivostok)

Features of the geochemical composition of bottom sediments on the shelf of the Siberian Arctic

Ключевые слова: осадочное вещество, микроэлементы, металлы, Арктика

В донных отложениях на шельфе Сибирской Арктики проведена комплексная оценка пространственного распределения микроэлементов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo). Выявлено локальное обогащение Cu, Mo и As. Выявлены основные факторы распределения микроэлементов в донных отложениях: гранулометрический состав и окислительно-восстановительные условия.

Арктика является наиболее чувствительным регионом Земли, где темпы потепления в четыре раза превышают среднемировые [1]. Продолжающиеся климатические изменения в Арктике вызвали ряд важнейших обратных реакций экосистемы, таких как сокращение площади морского льда, увеличение речного стока и дестабилизация наземной и подводной многолетней мерзлоты [2–5]. В настоящее время одной из основных задач полярной науки об окружающей среде является понимание судьбы различных соединений, которые извлекаются из многолетней мерзлоты и переносятся через атмосферные, гидрологические и наземные системы и создают возникающие экологические риски [6].

Цель данного исследования комплексная оценка пространственного распределения микроэлементов металлов (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo) в поверхностных слоях донных осадков Карского, Лаптевых и Восточно-Сибирского морей.

Пробы осадков были отобраны на 10 станциях в Карском море, море Лаптевых и Восточно-Сибирском море в ходе рейсов АМК-82 и АМК-86 в 2020 и 2021 гг. на борту НИС «Академик М. Келдыш». Мощность керна не превышала 10 см (рисунок). Исследуемые осадки были нарезаны на слои толщиной 1 см и хранились при –20°C до анализа.

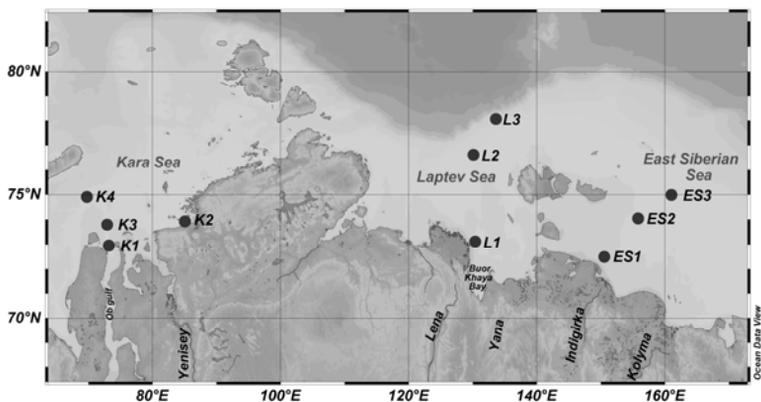


Рисунок. Схема расположения станций.

Был проведен химический анализ донных отложений. Металлы (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo) определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, NexIon 300D, Perkin Elmer, США). Для контроля точности анализа использовались многокомпонентные стандарты Perkin Elmer. Датировка кернa была основана на хронологии ^{210}Pb , чтобы определить скорость накопления отложений на каждом участке. Гранулометрический анализ был проведен на лазерном анализаторе.

Так же были определены индекс геоаккумуляции (Igeo) и коэффициент обогащения (EF), для определения уровня загрязнения и обогащения донных отложений исследуемыми микроэлементами. В качестве нормализующего элемента, при определении EF, использовали Li, который, как полагают, эффективно компенсирует естественную изменчивость содержания микроэлементов в высокоширотных эстуариях и прибрежных отложениях [7, 8]. Чтобы обеспечить более точную оценку возможных изменений в столетних данных о запасах донных отложений в сибирских арктических морях, мы использовали местные фоновые данные доантропогенного периода. Таким образом, концентрации элементов в керне отложений K3 на глубине 9 см, в L3 – на глубине 5–8 см и в ES3 – на глубине 5–10 см (что соответствует доиндустриальному периоду согласно датировке ^{210}Pb) были использованы в качестве региональных геохимических фоновых значений для анализа.

Все изученные осадки сложены преимущественно крупным и мелким алевритом с различным содержанием песка и глины. В Карском и Восточно-Сибирском морях в прибрежной зоне накапливаются более песчаные (крупнозернистые) осадки, по мере удаления от берега увеличивается вклад глинистых (мелкозернистых) отложений, что является характерным распределением для данного региона. В море Лаптевых мы

наблюдаем обратную картину: увеличение песчаной фракции с глубиной. Эта тенденция может быть связана с интенсивными газо-флюидными разгрузками, ранее зафиксированными в районе станции L3, на внешнем шельфе, которые способны приводить к «выдуванию» мелкозернистых осадков [9].

В исследуемых отложениях прослеживаются четкие закономерности распределения микроэлементов от берега к шельфу. В отложениях Карского моря увеличивается концентрации Cr, Zn, Cu, Ni и Mo вдоль Обского разреза по мере удаления от берега, при более умеренном накоплении Co. Напротив, для V и As в этом регионе характерны обратные тенденции в распределении. В море Лаптевых наблюдается рост концентраций V, Co, Zn, Ni и Mo по мере удаления от берега. Аналогичным образом, в Восточно-Сибирском море мы наблюдали увеличение концентраций V, Co, Zn, Cu, Ni и Mo, а Cr был единственным элементом, демонстрирующим тенденцию к снижению.

Во всех трех морях наблюдается сильная положительная корреляция между содержанием глины/мелкого ила и большинством микроэлементов (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, V, Mo). Это связано с высокой адсорбционной способностью мелких частиц, обусловленной их большой удельной поверхностью и реакционной способностью. Наиболее выраженными корреляционными связями являются: Ni, Cr, Zn ($r > 0.7-0.97$) – особенно в Карском и Восточно-Сибирском морях.

Песок демонстрирует отрицательную корреляцию с большинством металлов (Cr, Ni, Zn и др.), что подтверждает их низкую сорбцию на крупных частицах. Единственными исключениями являются: As – положительно коррелирует с песком ($r = 0.56-0.69$), что указывает на его связь с окислительными условиями или сульфидными минералами. Mo в море Лаптевых также имеет положительную связь с песком ($r = 0.73$), вероятно, из-за осаждения, контролируемого окислительно-восстановительными процессами.

Cr, Co, Ni, Cu, Zn образуют стабильные кластеры с высокой взаимной корреляцией ($r > 0.7-0.98$), что указывает на их общий источник и сходное геохимическое поведение. V в Восточно-Сибирском море тесно связан с Ni и Cr ($r > 0.9$), что может указывать на общий литогенный или диагенетический источник.

В исследуемых станциях среднее значение EF меньше 1.5, что свидетельствует о том, что донные отложения либо не обогащены, либо обогащены в незначительной степени данными микроэлементами. В Карском море в точке K2 наблюдается обогащение Cu, а в море Лаптевых наблюдается обогащение As и Mo, индекс EF для этих металлов больше 3, что может указывать на антропогенное загрязнение.

Средние значения Igeo для V, Cr, Co, Ni и Zn указывают на незагрязненные уровни во всех местах отбора проб. Профиль Оби (станции

K1 и K3) умеренно загрязнен Mo (до 1,76). Станция K2 умеренно и от умеренно до сильно загрязнена Cu и Mo. Море Лаптевых умеренно загрязнено As и от сильно до чрезвычайно сильно загрязнено Mo.

Подводя итог, данное исследование показывает, что V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn в основном находятся в фоновых значениях на арктическом сибирском шельфе, только в районе реки Пясины наблюдается умеренное загрязнение Cu, а в море Лаптевых – Mo и As, возможно антропогенного происхождения. Также было выявлено, что основными факторами распределения микроэлементов в донных отложениях являются: гранулометрический состав – мелкие фракции (глина, ил) являются основными переносчиками большинства металлов; окислительно–восстановительные условия – определяют поведение As и Mo, которые накапливаются в песках или сульфидных средах.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17 20030, <https://rscf.ru/project/24-17-20030/>»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jacobs P., Lenssen N.J.L., Schmidt G.A., Rohde R.A. The Arctic Is Now Warming Four Times As Fast As the Rest of the Globe // AGU Fall Meeting. New Orleans, 2021. P. A13E-02.
2. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // Nature Communications. 2017. V. 8. P. 1–13.
3. Brown N.J., Nilsson J., Pemberton P. Arctic Ocean freshwater dynamics: Transient response to increasing river runoff and precipitation // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. V. 124. P. 5205–5219.
4. Nielsen D.M., Pieper P., Barkhordarian A. et al. Increase in Arctic coastal erosion and its sensitivity to warming in the twenty-first century // Nature Climate Change. 2022. V. 12. P. 263–270.
5. Post E., Bhatt U.S., Bitz C.M. et al. Ecological consequences of sea-ice decline // Science. 2013. V. 341. P. 519–524.
6. Miner K.R., D’Andrilli J., Mackelprang R. et al. Emergent biogeochemical risks from Arctic permafrost degradation // Nature Climate Change. 2021. V. 11(10). P. 809–819.
7. Loring D.H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // Marine Chem. 1990. V. 29. P. 156–168.
8. Loring D.H. Normalization of heavy-metal data from estuarine and coastal sediments // ICES J. Mar. Sci. 1991. V. 48. P. 101–115.
9. Panova E.V., Ruban A.S., Dudarev O.V. et al. Lithological features of surface sediment and their influence on organic matter distribution across the east-siberian arctic shelf. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University // Geo Assets Engineering. 2017. V. 328. № 8. P. 94–105.

A comprehensive assessment of the spatial distribution of trace elements (V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo) was conducted in the bottom sediments of the Siberian Arctic shelf. Local enrichment of Cu, Mo, and As was identified. The main factors controlling the distribution of trace elements in these sediments were determined to be granulometric composition and redox conditions.

**Чаркин А.Н.¹, Кособокова К.Н.², Ершова Е.А.³, Семин В.Л.²,
Семкин П.Ю.¹, Колбасова Г.Д.^{2,4}, Дударев О.В.¹,
Леусов А.Э.¹, Гуленко Т.А.¹, Старцев А.М.¹, Красиков В.А.¹,
Файман П.А.¹, Ульяновцев А.С.², Зверев С.А.¹,
Бессонова Е.А.¹, Юрикова Д.А.²**

(¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: charkin@poi.dvo.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва; ³Institute of Marine Research, Берген, Норвегия; ⁴Беломорская биологическая станция имени Н.А. Перцова, МГУ, Москва)

Тепловодный «оазис жизни» Чаунской губы (Восточно-Сибирского море): причины возникновения и существования

**Charkin A.N.¹, Kosobokova K.N.², Ershova E.A.³,
Syomin V.L.², Semkin P.Yu.¹, Kolbasova G.D.^{2,4},
Dudarev O.V.¹, Leusov A.E.¹, Gulenko T.A.¹, Startsev A.M.¹,
Krasikov V.A.¹, Fayman P.A.¹, Ulyantsev A.S.², Zverev S.A.¹,
Bessonova E.A.¹, Yurikova D.A.²**

(¹Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok; ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³Institute of Marine Research (IMR), Bergen, Norway; ⁴N.A. Pertsov White Sea Biological Station, Lomonosov Moscow State University)

Warm-water "oasis of life" of Chaunskaya Bay (East Siberian Sea): reasons for its emergence and existence

Ключевые слова: подземные воды, субмаринная разгрузка, Арктика, Восточно-Сибирское море, Чаунская губа

Осенью 2020 г. в ходе междисциплинарных исследований в Чаунской губе Восточно-Сибирского моря была выяснена причина существования уникального рефугиума с теплолюбивыми биоценозами. Комплекс различных методов помог установить не только факт разгрузки субмаринных подземных вод, но и их гидротермальный генезис.

В Восточно-Сибирском море с середины прошлого столетия известен уникальный рефугиум в акватории Чаунской губы с теплолюбивыми биоценозами, нетипичными для данного района Сибирской Арктики. В конце 80-х годов экосистемы Чаунской губы были подробно изучены экспедицией Зоологического института АН СССР, которой было описано большинство известных на сегодняшний день высоко бореальных видов, обитающих в данной акватории (Экосистемы..., 1994). Исследователями было сделано предположение, что обнаруженные не характерные для Сибирской Арктики представители биоты могли проникнуть сюда во время последнего климатического оптимума, однако ответ на вопрос, как они

смогли просуществовать до сегодняшнего дня в полузакрытом водоеме с суровым климатом, не был найден.

Для решения данной проблемы были инициированы исследования в Чаунской губе с междисциплинарным подходом, включающим гидрохимические, гидрологические, геохимические, геологические, геофизические и гидробиологических методы. В результате, с помощью данного междисциплинарного подхода, а также специально разработанного для данных исследований робототехнического комплекса Smart Fish 40-летняя загадка «арктического оазиса» в Чаунской губе была решена в самые короткие сроки. Причиной возникновения данного оазиса стали подводные гидротермальные источники, поставляющие тепло, минеральные вещества, растворенные микроэлементы, а также биогены в акваторию губы столь необходимые для поддержания жизни теплолюбивых и многочисленных биоценозов. Геомагнитные данные показали, что в местах разгрузки подземных вод достаточно близко к поверхности дна подходит вулканогенный интрузив, а на глубине 5–50 км имеются признаки наличия расплавленной магмы. Данное обстоятельство предопределило формирование конвективной циркуляции морских вод в осадочной толще, что и обеспечило субмаринную разгрузку термальных вод. Гидротермальный генезис данных вод также был подтвержден изотопными данными. Роль данных подводных источников в поставке дополнительного тепла в акваторию губы была поддержана расчетами баланса тепла для всей акватории губы.

Научные исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 25–67–00001. Экспедиционные исследования выполнялись при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Госзадания ТОИ ДВО РАН: АААА-А20-120011090005-7.

In the fall of 2020, during interdisciplinary research in the Chaunskaya Bay of the East Siberian Sea, the reason for the existence of a unique refugium with thermophilic biocenoses was found. A set of different methods helped to establish not only the fact of the discharge of submarine groundwater, but also their hydrothermal genesis.

**Элькина Д.В.¹, Пискарев А.Л.^{1,3}, Гусев Е.А.¹,
Баженова И.Д.^{1,3}, Гагаев А.С.², Гетман К.В.^{1,3},
Овсянникова Е.С.^{1,2}, Попова Е.А.^{1,2}, Хоснуллина Т.И.^{1,3}**
(¹ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, email: d.elkina@vniio.ru, ²ААНИИ, Санкт-Петербург, ³Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле, Санкт-Петербург)

Источники и скорость четвертичного осадконакопления в Арктическом бассейне по результатам корреляции значений магнитной восприимчивости в колонках донных осадков, отобранных в рейсе СП-42

**Elkina D.V.¹, Piskarev A.L.^{1,3}, Gusev E.A.¹, Bazhenova I.D.^{1,3},
Gagaev A.S.², Getman K.V.^{1,3}, Ovsyannikova E.S.^{1,2},
Popova E.A.^{1,2}, Khosnullina T.I.^{1,3}**
(¹VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, ²AARI, St. Petersburg, ³St-Petersburg State University-Institute of Earth Sciences)

Sources and rate of Quaternary sedimentation in the Arctic Basin based on the results of the correlation of magnetic susceptibility values in the cores of the sea floor sediments, NP-42 cruise

Ключевые слова: Арктический бассейн, осадконакопление, донные осадки, магнитная восприимчивость

Значения измеренной в колонках донных осадков магнитной восприимчивости хорошо коррелируют между соседними колонками и дают возможность оценить направление изменения скорости осадконакопления. Повышенные значения магнитной восприимчивости связаны либо с прослоями вулканогенных осадков, либо с привносом рудного компонента.

В рейсах ледовой станции СП-41 и СП-42 изучались физические характеристики колонок донных осадков. Длина колонок, как правило, составляла 2–3 м, длина отдельных колонок достигала 4.5 м. Особой информативностью, как показали измерения, обладает параметр магнитная восприимчивость.

Магнитная восприимчивость колонок СП41-08Т–СП41–63Т измерялась каппаметром MS2E1, Bartington по ненарушенной поверхности на борту самодвижущейся ледовой платформы с интервалом 2.5 см. Остальные колонки, опробованные в ходе экспедиции СП-41, измерялись с помощью каппаметра ПИМВ, Геодавайс, с интервалом 3 см в камеральных условиях. Колонки, отбираемые в ходе экспедиции СП-42, измеряются на борту по ходу экспедиции при помощи каппаметра ПИМВ, с интервалом 3 см.

Рейс ледовой станции СП-42 начался в юго-западном углу котловины

Подводников, вблизи восточного борта хребта Ломоносова, и до станции 29 проходил по абиссальной равнине Врангеля с глубинами моря до 2000 м. При этом станции от 24-й до 29-й находятся поблизости от юго-восточного окончания протягивающегося с севера отрога Геофизиков. Станции от 32 до 37 находятся в северной части котловины Подводников, где глубина моря превышает 2500 м. Станции от 39 до 49 располагались на западном склоне хребта Менделеева, а станции от 50 до 63 – в северной части осевой области хребта Менделеева. Станции, начиная с 66, расположены в пределах хребта Альфа, севернее осевой части хребта (рисунок).

На станциях 4–20, расположенных в пределах абиссальной равнины Врангеля, наблюдается корреляция экстремумов измеренных значений магнитной восприимчивости.

Исходя из корреляции значений магнитной восприимчивости, можно предположить, что максимальная скорость четвертичного осадконакопления на этом участке наблюдается в юго-западном углу котловины Подводников, вблизи бровки шельфа и склона хребта Ломоносова. При продвижении на северо-восток мы наблюдаем уменьшение мощности верхней толщи, маркируемой экстремумами магнитной восприимчивости, и, следовательно, увеличение скорости осадконакопления, вполне объяснимое, исходя из морфологии морского дна.

При приближении к отрогу Геофизиков отмечается новый участок, на котором наблюдается корреляция значений магнитной восприимчивости. Наибольшая скорость осадконакопления наблюдается на самой северной станции этого участка, ближе всего расположенном к отрогу Геофизиков.

На хребте Менделеева общий тренд, по мере продвижения на север и удаления от источников осадконакопления, – уменьшение скорости осадконакопления, выражающееся в уменьшении мощности верхнего горизонта, границы которого определены по экстремумам магнитной восприимчивости. В северной части хребта Менделеева есть данные определения скорости осадконакопления по палеомагнитным данным [1], которые демонстрируют уменьшение скорости осадконакопления в северо-восточном направлении. К северу от осевой зоны хребта Альфа отбор колонок производился в условиях резко меняющегося рельефа дна. Поэтому выдержанных горизонтов корреляции донных осадков по магнитной восприимчивости не наблюдается. Исходя из средней скорости осадконакопления в северной части хребта Менделеева и на хребте Альфа в 1 мм/тыс. лет, следует предполагать, что подошва осадков четвертичного периода в наших колонках находится на глубине порядка 2 м.

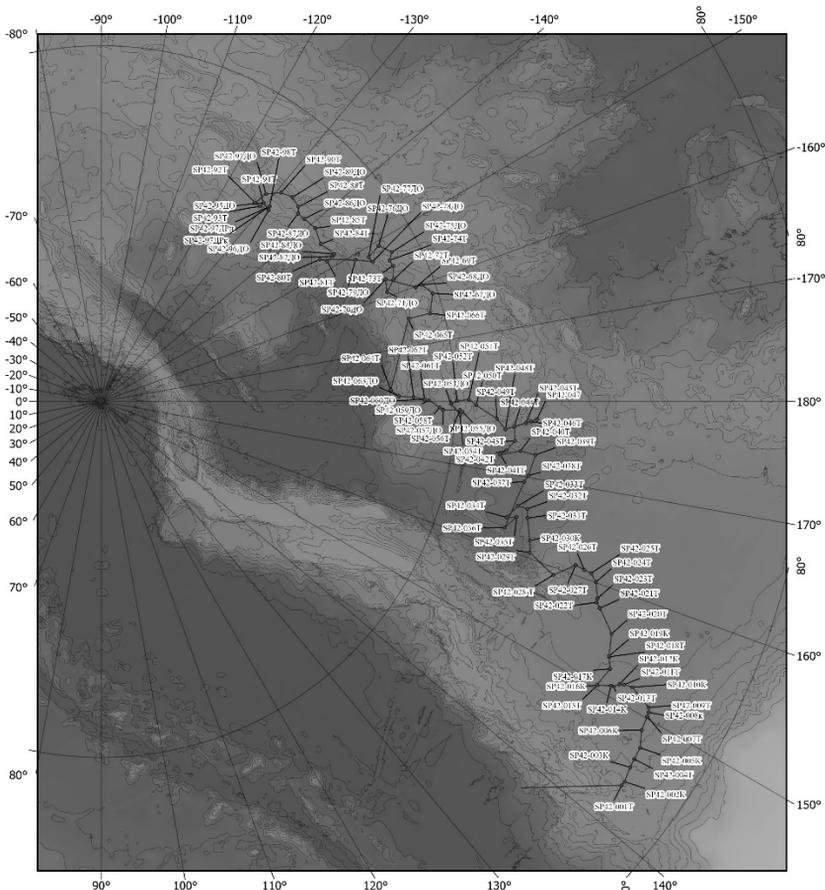


Рисунок. Обзорная карта станций пробоотбора в рейсе ледовой станции СП-42.

Природа изменений магнитной восприимчивости донных осадков в регионе определяется двумя факторами: гранулометрическим составом (при этом более магнитными обычно являются осадки с большей глинистостью) и минеральным составом. Наибольшей магнитной восприимчивостью обладают вулканогенные осадки и осадки с большим количеством пироксена, который обычно ассоциируется с мелкими зернами магнетита. Определенные выводы о природе изменений магнитной восприимчивости в колонках донных осадков, отобранных в рейсе СП-42, можно будет сделать после поступления данных гранулометрического и минералогического анализа. Сейчас можно отметить, что по магнитной восприимчивости эти колонки гораздо более монотонные, чем колонки, отобранные в

Евразийском бассейне в рейсе СП-41. По-видимому, это связано с большей близостью точек пробоотбора в рейсе СП-41 как к источникам осадконакопления, так и к действовавшим в плиоцен–четвертичное время вулканам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Elkina D.V., Piskarev A.L., Bezumov D.V. Sedimentation in the Central Arctic Submarine Elevations: Results of Comprehensive Analysis of Paleomagnetic and Seismoacoustic Data // *Geotectonics*. 2023. V. 57. Suppl. 1. P. S100–S111.

The values of magnetic susceptibility measured in the bottom sediments columns correlate well between adjacent columns and allow us to estimate the direction of change in the sedimentation rate. Increased values of magnetic susceptibility are associated either with volcanic sediments or with the introduction of an ore component.

**СИМПОЗИУМ
ИМ. П.Л. БЕЗРУКОВА
"ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
МИРОВОГО ОКЕАНА,
ГИДРОТЕРМЫ НА ДНЕ ОКЕАНОВ
И МОРЕЙ"**

**P.L. BEZRUKOV MEMORIAL
SYMPOSIUM "MINERAL
RESOURCES OF THE WORLD
OCEAN, HYDROTHERMS ON THE
BOTTOM OF THE SEAS AND
OCEANS"**

Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С.

(Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: aksentov@poi.dvo.ru)

Стратегические металлы в позднеголоценовых донных отложениях окраинных морей северо-востока Азии

Aksentov K.I., Sattarova V.V., Astakhov A.S.

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

Strategic metals in late Holocene bottom sediments of the marginal seas of northeast Asia

Ключевые слова: стратегические металлы, Арктика, Дальний Восток, запасы, донные осадки

Представлены данные по концентрациям малоизученных металлов (Li, Sc, W, Co, Ga) в донных осадках акватории окраинных морей северо-востока Азии. Выявлены особенности их распределения в региональном масштабе. Пределы найденных концентраций составили: Li – 6.5–116.7 мг/кг; Sc – 1.3–52.6 мг/кг; Ga – 4.4–25.6 мг/кг; REE – 30–234 мг/кг; Ni – 5.3–127 мг/кг; Co – 2.3–76.1 мг/кг; W – 0.1–5.4 мг/кг; Ti – 0.075–1.272%.

Россия обладает одними из крупнейших в мире разведанных запасов редких металлов, в том числе лития, ниобия, тантала, бериллия, редкоземельных металлов, ванадия, циркония, скандия, стронция, рубидия, цезия, галлия, гафния, индия, сырьевой потенциал которых является ключевой базой для развития новых технологий [1]. Территория северо-востока Азии входит в Тихоокеанский рудный пояс – одной из важнейших глобальных металлогенических структур, формировавшаяся начиная с позднего палеозоя в течение мезозойского и кайнозойского периодов [2]. Недрa пояса богаты не только благородными, но и черными, цветными и редкими металлами, а также другими ценными полезными ископаемыми [3]. Помимо этого, в прибрежной зоне расположены россыпи благородных и черных металлов, а в глубоководных котловинах полиметаллические руды [4, 5]. Донные отложения окраинных морей довольно неплохо изучены на типичные тяжелые металлы, которые обладающим токсическим эффектом (Hg, Pb, Cd). С другой стороны остальные стратегические металлы упускались из виду. В данной работе поставлена цель представить данные по некоторым малоизученным металлам в донных осадках акватории окраинных морей северо-востока Азии.

Проведенные исследования основываются на коллекции донных отложений, отобранных авторами в периоды с 2016 по 2021 гг. Пробы сушили в лиофильной сушилке и истирались в агатовой ступке. Определение элементного состава проводилось методами ИСП-МС и ИСП-АЭС в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа

ДВГИ ДВО РАН. Правильность анализа проверяли по международным стандартам донных отложений.

Распределение изучаемых элементов представлено на рисунках 1 и 2. Сходные распределения имеют Li, Ga, REE, где максимальные концентрации расположены в море Лаптевых и западной части Восточно-Сибирского моря. Это связано с выносом реками, дренирующими Анабарский щит, породы которого содержат высокие концентрации REE. В пределах щита расположено богатейшее комплексное редкометалльное месторождение, связанное с массивом Томтор. Также некоторое повышение этих элементов наблюдается в северной части Японского моря и западной части Курильской котловины Охотского моря. Здесь сказывается влияние терригенной компоненты с прилегающей суши. Уменьшение концентраций на остальной исследуемой акватории вероятно обусловлено преобладанием биогенного фактора, накоплением осадков, обогащенных диатомовыми водорослями.

Повышенные ореолы распространения Sc находятся вдоль восточного побережья Камчатки и вокруг центральных островов Курильской гряды, где известны титаномагнетитовые россыпи. Нам удалось исследовать только локацию на шельфе о. Итуруп. В пробе донных осадков, расположенных на глубине 30 м, концентрация Ti достигла 1.272%, при средней для всего региона 0.323%. Здесь также наблюдается максимальная концентрация Sc – 52.6 мг/кг.

В распределении Ni выделяются три области накопления: склон Восточно-Сибирского моря, абиссаль Тихого океана на траверзе о. Хоккайдо и котловина Дерюгина Охотское море. В котловине Дерюгина накапливаются металлоносные осадки, вероятно поступление Ni связано с современной гидротермальной деятельностью. Не исключено поступление из гидротерм в абиссали Тихого океана. Для W наблюдается несколько участков концентрирования: котловина Дерюгина, Курильская котловина Охотское море, Татарский трог Японское море и внешний шельф, склон Восточно-Сибирского моря.

Полученные данные показывают неоднородность распределения стратегических металлов. В зависимости от близости и мощности источников поступления выделяются ореолы рассеяния на морской дне. Обнаруженные концентрации не являются кондиционными для добычи стратегических металлов. Но на основе полученных данных можно наметить направление детализированных работ для выявления особенностей накопления металлов и поиска месторождений полезных ископаемых.

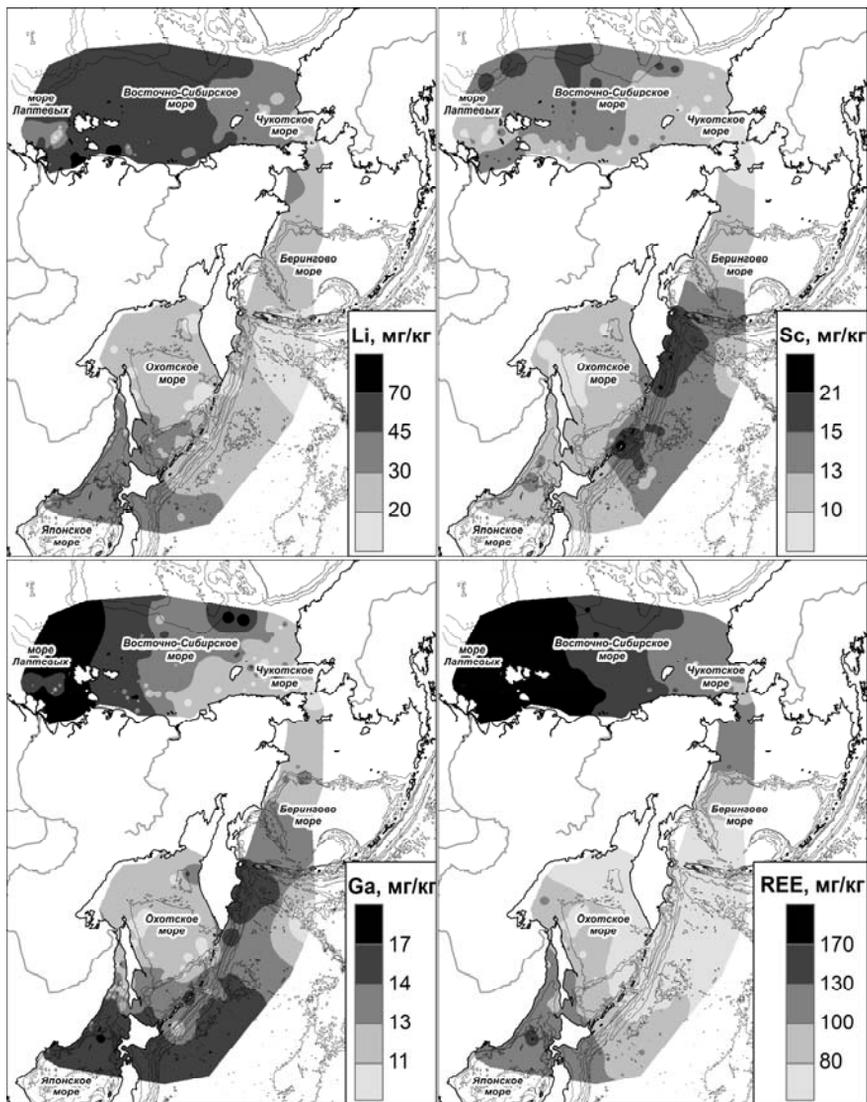


Рис. 1. Распределение Li, Sc, Ga, REE в поверхностном слое донных отложений

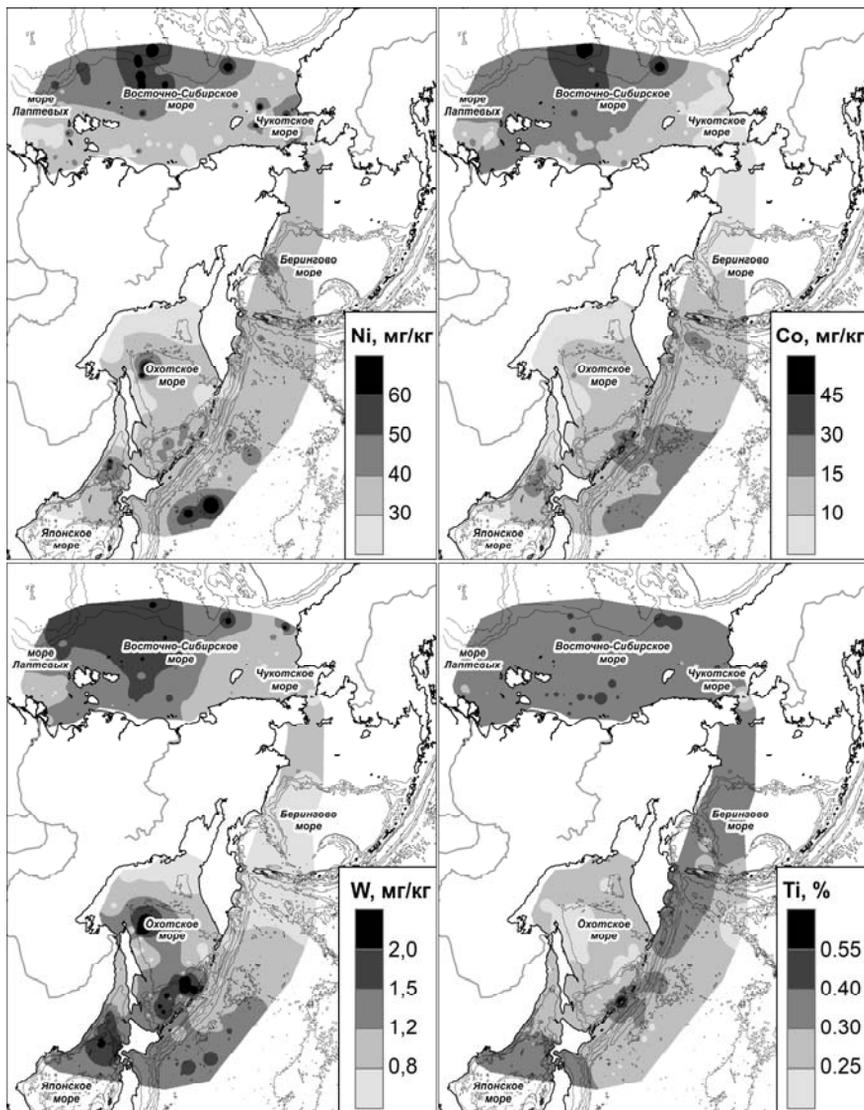


Рис. 2. Распределение Ni, Co, W, Ti в поверхностном слое донных отложений

Исследование выполнено в рамках госбюджетной темы НИР ТОИ ДВО РАН «Палеоокеанология морей северо-востока России, Северного Ледовитого и Тихого океанов, современное и мезозойско-кайнозойское осадкообразование, магматизм и рудообразование» № 124022100084-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2050 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.07.2024 № 1838-р. Интернет-ресурс. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202407290031> (Дата обращения 12.09.2025)
2. Радкевич Е.А. Металлогенические провинции Тихоокеанского рудного пояса. М.: Наука, 1977. 176 с.
3. Волков А.В. Перспективы открытия новых месторождений стратегических металлов на Северо-Востоке России // Золото и технологии. 2018. Т. 39. № 1. 28–36.
4. Андреев С.И. Минерально-сырьевой потенциал дальневосточных морей и перспективы его освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 4. С. 5–23.
5. Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. и др. Месторождения стратегических металлов арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.

The report presents data on the concentrations of poorly studied metals (Li, Sc, W, Co, Ga) in bottom sediments of the marginal seas of northeast Asia. Features of their distribution on a regional scale are revealed. The ranges of the found concentrations were: Li – 6.5–116.7 mg/kg; Sc – 1.3–52.6 mg/kg; Ga – 4.4–25.6 mg/kg; REE – 30–234 mg/kg; Ni – 5.3–127 mg/kg; Co – 2.3–76.1 mg/kg; W – 0.1–5.4 mg/kg; Ti – 0.075–1.272%.

**Бережная Е.Д.¹, Шадрина Д.А.^{1,2},
Римская-Корсакова М.Н.¹, Дубинин А.В.¹**

(¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, ²МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва; e-mail: evgeniya.berezhnaya@gmail.com)

Распределение РЗЭ между отдельными фазами осадков Бразильской котловины

**Berezhnaya E.D.¹, Shadrina D.A.^{1,2},
Rimskaya-Korsakova M.N.¹, Dubinin A.V.¹**

(¹Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, ²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow)

Distribution of Rare Earth Elements (REE) between phases in sediments of the Brazil Basin

Ключевые слова: редкоземельные элементы, биогенный апатит, оксигидроксиды железа и марганца, фосфор

Исследование посвящено изучению поведения редкоземельных элементов (РЗЭ) в осадках Атлантического океана (Бразильская котловина). Анализ осадков станции 1538 показал, что главные фазы, концентрирующие РЗЭ — биогенный апатит и оксигидроксиды марганца и железа. Показано, что рост содержаний РЗЭ связан с увеличением количества биогенного апатита в осадках.

Осадки, богатые РЗЭ, привлекают внимание исследователей после публикации об их ресурсном потенциале [1]. Наиболее перспективными районами считаются Западная, Центральная, Северо-восточная часть Тихого океана, центральная часть Индийского океана. Содержания РЗЭ в осадках Атлантического океана ниже. Целью исследования было изучить фазы осадка, концентрирующие РЗЭ и выявить основные закономерности формирования состава РЗЭ пелагических осадков Атлантического океана. Для исследования были выбраны осадки станции 1538, отобранные в 18-м рейсе НИС «Академик Сергей Вавилов» в Бразильской котловине. Для данных осадков характерны самые высокие содержания РЗЭ+У и марганца в Атлантическом океане.

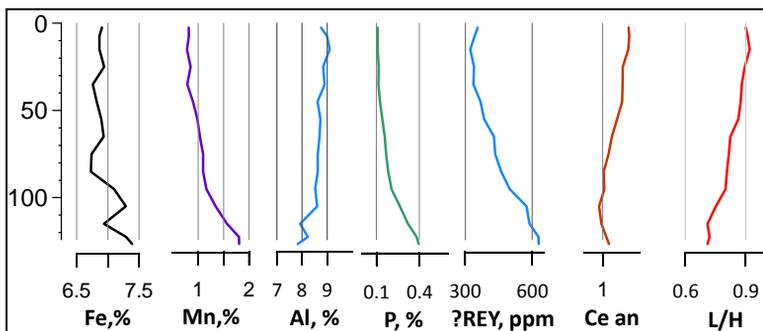


Рис. 1. Распределение элементов макросостава и РЗЭ, цериевой аномалии и величины L/H с глубиной в осадках станции 1538

Осадки окислены по всей толще (0.07–0.32% CaCO₃, 0.07–0.14% C_{орг}). Содержание алюминия и титана мало меняется по колонке (от 7.8 до 9.1% для Al и от 0.4 до 0.5% для Ti) Содержание железа в осадках с глубиной растет от 6.7 до 7.4%. Fe/Al составляет 0.8–0.9. Наиболее заметно меняются с глубиной содержания фосфора, марганца, кобальта, никеля и РЗЭ (рис. 1). Это изменение происходит на фоне практически неизменной литогенной компоненты осадка. Вниз по колонке увеличивается содержание РЗЭ, аномалия церия меняется с положительной на отрицательную, снижается величина отношения легких РЗЭ к тяжелым (L/H) [2]. РЗЭ в исследуемых осадках значимо связаны с фосфором, марганцем и железом. Для осадков наиболее различающихся по составу горизонтов (0–5 и 100–110 см) были выполнены вытяжки. Вытяжки подобраны таким образом, чтобы отделить фазы 1) карбонатов и фосфатов (L1); 2) фазу оксидов марганца и аморфного железа (L2); 3) оксигидроксидов железа (L3); 4) остаточную алюмосиликатную фазу (L4). В каждой вытяжке был определен состав редких и редкоземельных элементов и элементы макросостава.

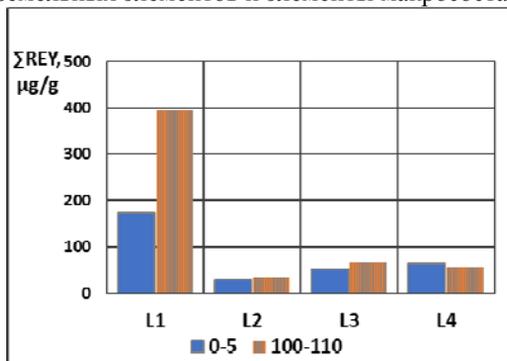


Рис. 2. Содержание РЗЭ+Y в вытяжках.

Наибольшее количество РЗЭ переходит в вытяжку L1 (рис. 2). Вытяжка L1 по макросоставу отвечает фазе карбонатов и фосфатов. Поскольку осадки практически бескарбонатные и карбонаты не накапливают РЗЭ, можно полагать, что основной вклад в состав РЗЭ вносит фаза фосфатов, представленная в данной вытяжке в основном биогенным апатитом [3, 4]. Состав РЗЭ вытяжки L1 отвечает составу биогенного апатита (рис. 3). Накопление РЗЭ в биогенном апатите происходит в постседиментационных условиях. Состав РЗЭ в костном детрите наследует основные черты состава окружающих вод – отрицательную аномалию церия и низкую величину L/H. Второй по значимости фазой, отвечающей за накопление РЗЭ, являются оксигидроксиды марганца и железа (вытяжки L2 и L3). Для марганцевой составляющей характерна более высокая величина аномалии церия, для железистой – более высокие содержания трехвалентных РЗЭ (рисунок 3). Фаза L4 горизонтов 0–5 и 100–110 см содержит практически равное количество РЗЭ и по своему составу похожа на сланец.

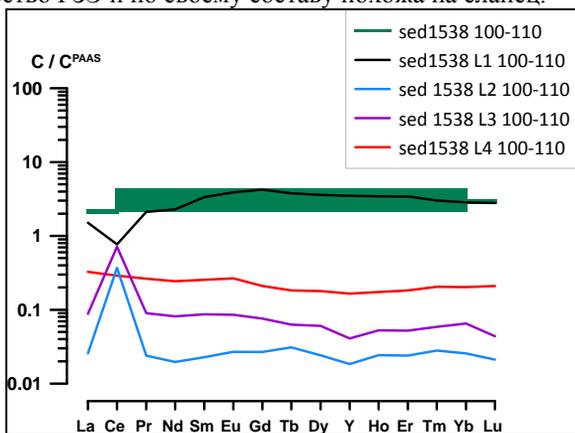


Рис. 3. Составы РЗЭ в вытяжках горизонта 100–110 см, нормализованные на сланец PAAS [5]

Различия в содержаниях РЗЭ между двумя горизонтами осадков обусловлены составом вытяжки L1, состав и содержания остальных вытяжек (L2-L4) мало различаются между горизонтами. Очевидно, увеличение фосфора (а именно биогенного апатита) в осадках в 3 раза привело к кратному увеличению содержания РЗЭ. Накопление биоапатита может быть связано с изменением биопродуктивности или с более низкими темпами седиментации в ходе образования отложений на горизонте 100–110 см.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФ, проект № 25-27-00394.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kato Y., Fujinaga K., Nakamura K. et al. Deep-sea mud in the Pacific Ocean as a potential resource for rare-earth elements. // *Nat. Geosci.* 2011. V. 4. P. 535–539.
2. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане // *Литология и полезные ископаемые.* 2004. № 4. С. 339–349.
3. Fan W. et al. Identifying the roles of major phosphorus fractions in REY enrichment of Pacific deep-sea sediments using sequential extraction and mineralogical analysis // *Ore Geology Reviews.* 2023. V. 157. P. 105430.
4. Ruttenberg K.C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments // *Limnology and oceanography.* 1992. V. 37. № 7. P. 1460–1482.
5. Taylor S.R., McLennan S.M. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences.* 1981. V. 301. № 1461. P. 381–399.

The study is devoted to the investigation of the distribution of rare earth elements (REE) in the sediments of the Atlantic Ocean (Brazil Basin). The analysis of sediments from station 1538 revealed that the main phases concentrating REE are biogenic apatite and oxyhydroxides of manganese and iron. It has been shown that the increase in REE content is associated with an increase in the amount of biogenic apatite in the sediments.

**Ванштейн Б.Г.¹, Верещака С.А.², Ткаченко Г.Г.¹,
Лодочникова А.С.¹**

(¹ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга», г. Санкт-Петербург, e-mail: vanshbor@mail.ru; ²Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова)

Комплексные газогидрогеохимические исследования на западном шельфе Азовского моря

**Vanshtein B.G.¹, Vereshchaka S.A.², Tkachenko G.G.¹,
Lodochnikova A.S.¹**

(¹FGBU "Academician I. S. GRAMBERG All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean", St. Petersburg; ²Odessa National University named after I.I. Mechnikov)

Comprehensive gas-hydrogeochemical studies on the western shelf of the Sea of Azov

Ключевые слова: донные осадки, углеводородные газы, Азовское море

Приведены результаты исследований по особенностям распределения углеводородных газов (УВГ) и всей геологической ситуации, базирующей на геологических и геофизических методах, позволили выявить общие закономерности и характер распределения газов в донных отложениях и факторы, их контролирующие, на западном шельфе Азовского моря.

Исследованиями по особенностям распределения углеводородных газов (УВГ) и всей геологической ситуации, базирующей на геологических и геофизических методах, позволили выявить общие закономерности и характер распределения газов в донных отложениях и факторы, их контролирующие на западном шельфе Азовского моря.

Сложность морской газогеохимической съемки в исследуемом районе заключается в том, что в пределах четвертичной толщи залегают различные по генезису и степени преобразования осадки. Все это создает дополнительные трудности при интерпретации полученных результатов, т.к. необходимо сравнивать отложения, в которых в одном случае активно протекают биохимические процессы, в другом – они только начинаются, в третьем – они уже затухают. Поэтому при интерпретации полученных данных были выделены различные вещественно-генетические типы донных отложений и с учетом горизонта опробования оценивались закономерности распределения УВГ в каждой выборке, что позволило построить карты распределения метана и суммы тяжелых УВ в донных отложениях исследуемой акватории. Это позволило оценить общий характер распределения УВГ каждого литологического типа в зависимости от глубины опробования, а также выявить аномальные концентрации УВГ.

Совпадение аномальных значений по всем геохимическим параметрам с определенными структурно-тектоническими элементами, а также контрастность их проявления позволяет выявить участки акватории наиболее перспективные для постановки поисковых работ. Такой подход на фоне локальных закономерностей распределения аномальных показателей дает возможность выявить общие тенденции, характеризующие район в целом, что и нашло отражение в таблице.

Таблица. Распределение аномальных значений геохимических параметров, приуроченных к определенным структурно-тектоническим элементам верхнего и нижнего горизонтов опробования

Районы	Аномальные показатели	СН ₄	ΣТУ	С ₃ Н ₈
	Структурно-тектонические показатели			
Верхний горизонт				
Склон Украинского щита	Локальные поднятия	1	-	2
	Тектонические нарушения	6	1	1
	Без привязки	4	5	6
Северо-Азовский прогиб	Локальные поднятия	12	12	7
	Тектонические нарушения	19	17	9
	Без привязки	5	7	10
Нижний горизонт				
Склон Украинского щита	Локальные поднятия	3	-	2
	Тектонические нарушения	4	4	6
	Без привязки	4	9	8
Северо-Азовский прогиб	Локальные поднятия	13	7	2
	Тектонические нарушения	16	13	11
	Без привязки	7	7	11

Анализ карт распределения аномальных показателей верхнего и нижнего горизонтов, что суммарные показатели локализируются на четырех участках: в районе локальных поднятий Бердянское и Обручев, где более ранними работами были обнаружены контрастные аномалии и участки в Обиточном и Белосарайском заливах, которые представляют поисковый интерес с учетом того, что на структуре Обручева поисково-разведочным бурением был обнаружен газ.

Анализ характера и закономерностей распределения аномальных концентраций УВГ позволяет сделать следующие выводы:

- максимальное количество аномальных значений практически всех

геохимических параметров приурочено к Северо-Азовскому прогибу. Наибольший интерес при оценке перспективности нефтегазоносности представляют аномалии по метану и ΣTU ;

- существенных различий между аномальными концентрациями на разных уровнях опробования не наблюдается, что доказывает постоянство выявленных аномалий во времени и пространстве;

- оценка перспективности отдельных локальных поднятий может быть получена только при комплексной интерпретации геофизических и геохимических данных, т.к. выявленные с помощью геофизических методов локальные поднятия в большинстве случаев по геохимическим данным оцениваются как структуры, характеризующиеся средними (фоновыми) содержаниями УВГ;

- в пределах изученной площади по результатам комплексной геолого-геохимической интерпретации наиболее перспективными для постановки первоочередных детальных поисковых геологоразведочных работ являются локальные поднятия Весеннее и Бердянское, а также Приморское и Кефаль.

The results of studies on the features of the distribution of hydrocarbon gases (HCGs) and the whole geological situation, based on geological and geophysical methods, allowed to identify the general patterns and character of the gases distribution in bottom deposits as well the factors controlling them in the western water area of Asov Sea.

Дунаев Н.Н.

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail: dunaev@ocean.ru)

К проблеме поиска и оценке запасов песка на Анапском шельфе

Dunaev N.N.

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

On the Issue of Sand Resource Exploration and Assessment on the Anapa Shelf

Ключевые слова: морские берега, геоморфология, вулканизм, литодинамика, неотектоника, экзогенные процессы

Лучшим в Европе пляжам Анапской пересыпи требуется срочное пополнение песком. История развития пересыпи и палеогеографическая обстановка региона в позднечетвертичное время позволяют предполагать наличие запасов близкого по минеральному и механическому составу песка на сопредельном шельфе.

Анапская пересыпь (рис. 1) представляет собой гетерогенную крупную аккумулятивную береговую форму, сложенную преимущественно песком терригенного и морского происхождения с небольшим включением гальки и ракушечного детрита. Она обрамляет северо-восточный участок Черного моря в районе Таманского полуострова на протяжении около 47 км при ширине от 80 м в северной части до 1.5 км в южной. К настоящему времени установлено, что данная аккумулятивная форма образовалась в позднем голоцене волновым режимом трансгрессирующего моря, обусловившим перемещение в сторону суши преимущественно песчаного аллювия реки Пра-Кубани, протекавшей в позднем неоплейстоцене-раннем голоцене в пределах сопредельного шельфа. Заметное поступление материала было в результате абразии мыса Железный Рог и его вдольберегового переноса на юго-восток в направлении к Анапскому мысу [1, 2].



Рис. 1. Местоположение Анапской пересыпи. 1 – озеро Соленое, 2 – Кизилташский лиман, 3 – Витязевский лиман.

С 2020 г. Анапская пересыпь входит в состав особо охраняемых природных территорий (ООПТ) Краснодарского края РФ в категории «природный парк» общей площадью 32 869.8 га. Район пересыпи занимает ведущее место в России в отношении санитарно-курортного лечения, морского туризма, детского отдыха и др. Главным рекреационным ресурсом пересыпи являются ее пляжи, лучшие в Европе. В последние десятилетия зарегистрировано отступление береговой линии и сокращение ширины пляжей, а в 2003 г. произошло обширное заражение их мазутом. Последнее вызвало необходимость изъятия с пляжей большого количества загрязненного песка, что еще сильнее осложнило динамику приурезовой зоны. Для поддержания функционирования пляжей и пересыпи в целом необходима периодическая подсыпка песка аналогичного минерального и механического состава. Иной песок может еще сильнее усугубить негативную ситуацию. Подходящий песок можно поискать на прикавказской низменности, где в позднечетвертичное время меандрировала р. Кубань с ее притоками, а также на сопредельном Анапском шельфе.

Главными факторами, благоприятствующими накоплению залежей песка на Анапском шельфе являются вынос аллювия Пра-Кубани – самой крупной реки Северного Кавказа и кинематика уровня Черного моря в поздне-последледниковье конца неоплейстоцена, примерно от 16 тыс.л.н. до середины голоцена, когда вследствие оформления пересыпи к этому времени прекратился вынос речного аллювия на шельф. Определить его распределение по площади шельфа особенно в виде аккумулятивных форм (песчаных валов и банок) является важнейшей задачей. Учитывая, что добыча песка с морского дна эффективна до глубины воды 30 м, реже до 50 и немногим более метров, следует особенно подробно изучить шельф в этих пределах, начиная с глубины воды 10 м. Последнее обусловлено тем, что поверхность подводного берегового склона пересыпи до глубины 8–10 м сложена пляжеобразующим песком, Его нельзя трогать, поскольку он участвует в годами сформировавшейся динамике береговой зоны. О наличии запасов песка на шельфе Таманского полуострова известно из предшествующих исследований [3, 4]. Проблема заключается в оконтуривании потенциально перспективных участков и оценке их запасов. И здесь важно принять концепцию кинематики уровня Черного моря в рассматриваемый период, поскольку до настоящего времени идет дискуссия о величине его снижения в ледниковье и характере последующей трансгрессии. Между тем, от перечисленных позиций зависело местоположение во времени дельты Палео-Кубани как источника песка, а от скорости повышения уровня, его постепенной или с замедлениями, либо стабилизациями непрерывности или возвратно поступательной кинематики зависели места накопления или ненакопления перспективных к разработке залежей песка, динамика перемещения к берегу песчаных наносов,

формирования из них аккумулятивных тел, их консервации на месте образования или смещения к берегу по мере продвижения послеледниковой морской трансгрессии.

На основании анализа изложенных материалов можно предложить концепцию обстановки возможных формирований залежей песка на Анапском шельфе и их расположения. Прежде всего, необходимо принять вариант кинематики уровня Черного моря в позднем неоплейстоцене–голоцене, не вдаваясь в дискуссии их авторов по частным вопросам. Например, его исторической связи с Мировым океаном и отметкам их наиболее низкого стояния, оценки глубин Босфорского порога, отношения к фанаторийской трансгрессии позднего голоцена (2.6–1.7 тыс.л.н.), существование которой либо отрицается, либо ассоциируется с регрессией от первых метров до 20 м эвстатической или неотектонической причины, и др. Отметим, что построение универсального графика колебаний уровня Мирового океана в ледниковье–послеледниковье позднего неоплейстоцена–голоцена не представляется возможным в силу неоднозначного проявления на Земле климатических, неотектонических, вулканических и других причин.

Как видно из рис. 2, даже в пределах узкорегиональной территории, какой является Таманский полуостров, для наиболее изученной заключительной фазы позднего голоцена нет единого графика состояния уровня моря. А допускать фазу стремительного подъема уровня Мирового океана от его минимального состояния с началом деградации поздненеоплейстоценового (валдайского, или вюрмского) оледенения (рис. 3, А), значит предполагать, что климат в эту эпоху был жарче, чем в современной Сахаре, что не подтверждается палеогеографией данного периода. Поэтому принимать некую усредненную кривую его уровня за основу вне зависимости от авторитета ее составителей при наших исследованиях не видится правомерным, как и кривые (графики) уровня по удаленным районам. В этом контексте район Таманского полуострова и его шельф является весьма индивидуальным с его активной новейшей тектоникой и грязевым вулканизмом. Исходя из наиболее представительных, на наш взгляд, публикаций по поводу изменений уровня Черного моря в рассматриваемый период [3, 6–9], принимаем концепцию о прерывисто-непрерывной трансгрессии Черного моря в рассматриваемое время, а начало голоцена – с бугазской фазы трансгрессии от отметки уровня моря –17 м. При такой кинематике уровня моря значительная часть аллювия Пра-Кубани вовлекалась в движение с результирующим направлением в сторону суши и формированием аккумулятивных форм, отдельные из которых оставались близ места их зарождения, а другие, постепенно перемещаясь и соединяясь, привели к образованию Анапской пересыпи. Мощностью голоценовых осадков, перекрывающих переработанный аллювий, невелика и обычно не превышает первых метров.

Поэтому относительно крупные неровности их основы, по крайней мере, их большей части в виде аккумулятивных подводных валов и банок, не сnivelированы. Анализируя современный рельеф Анапского шельфа по батиметрическим картам среднего и крупного масштабов с построением изобат через 1 м, принимаем, что уровень Черного моря в ледниковье не опускался ниже примерно -65 м. Это согласуется с выводами ряда исследователей [8 и др.], а отчетливо выраженный уступ $-40 \div -65$ м на внешнем шельфе может фиксировать нижний край дельты Пра-Кубани. Для уточнения геолого-геоморфологического строения Анапского шельфа и генезиса локальных возвышений его современного рельефа необходимо выполнить высокоразрешающие сейсмоакустические рекогносцировочные исследования и по их данным бурение нескольких мелких скважин. При этом, особое внимание обратить на район предполагаемой пра-дельты, участки рельефа, выраженные мысами и банкоподобными возвышениями. В случае обнаружения перспективных участков локальные понижения рельефа в результате забора песка на рекомендованных глубинах дна не приведут к перестройке существующих уклонов подводного берегового склона и динамики береговых наносов вследствие их безопасной удаленности от берега. В качестве рабочих вариантов кривых уровня моря можно рассмотреть графики А, Е на рис. 3Б.

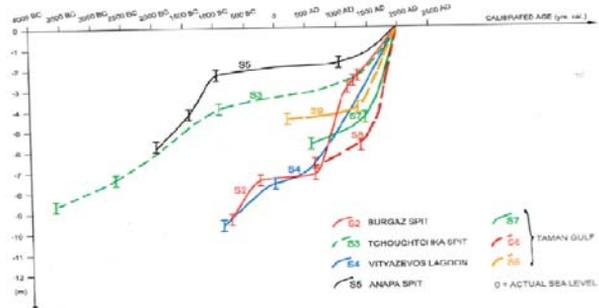


Рис. 2. Пример региональной флуктуации уровня моря. Таманский полуостров [5].

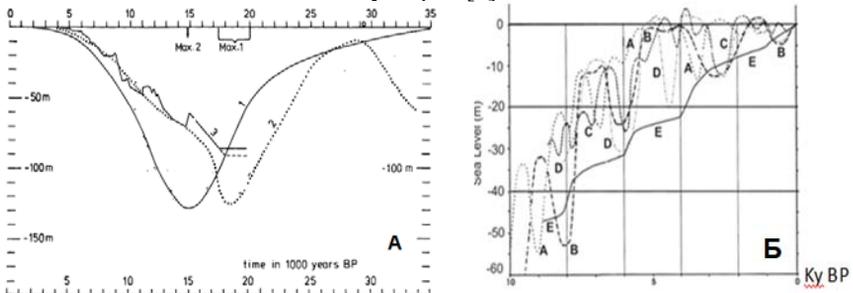


Рис. 3. Представления об изменении уровня Мирового океана в позднем

неоплейстоцене – голоцене [из открытых источников]. А: 1 – Milliman, Emery, 1968; 2 – Curray, 1965; 3 – Mögner, 1976. Б: А – Балабанов, Измайлов, 1988; Е – Невесский, 1970.

Работа выполнена в соответствии с темой Госзадания ИО РАН FMWE-2024-0018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Измайлов Я.А. Эволюционная география побережий Азовского и Черного морей. Кн. 1. Анапская пересыпь. Сочи: Лазаревская полиграфия, 2005. 175 с.
2. Косьян Р.Д., Крыленко В.В., Крыленко М.В. Геосистема Анапской пересыпи. М.: Научный мир, 2021. 262 с.
3. Невесский Е.Н. Процессы осадкообразования в прибрежной зоне моря. М.: Наука, 1967. 254 с.
4. Айбулатов Н.А., Щербаков Ф.А., Кузнецов В.Г., Студзинский В.П. Новые данные о происхождении Анапской пересыпи и прилегающих районов шельфа Черного моря // Современные процессы осадконакопления на шельфах Мирового океана. М.: Наука, 1990. С. 145–149.
5. Fouache E., Porotov A., Gorlov Y. The role of neotectonics in the variation of the relative mean sea level throughout the last 6000 years on the Taman peninsula (Black sea, Azov sea, Russia) // Polish Geological Institute Special Papers. 2004. V. 11. P. 47–58.
6. Бадюкова Е.Н. История развития пролива Босфор и соединение Средиземного и Черного морей в позднем плейстоцене-голоцене // Черноморский регион в условиях глобальных изменений климата: закономерности развития природной среды за последние 20 тыс. лет и прогноз на текущее столетие. М.: МГУ, 2010. С. 4–24.
7. Балабанов И.П., Измайлов Я.А. Изменение уровня и гидрохимического режима Черного и Азовского морей за последние 20 тыс. лет // Водные ресурсы. 1988. № 6. С. 54–62.
8. Конигов Е.Г. Колебания уровня Азово-Черноморского бассейна и миграции береговой линии в новоэвксине и голоцене // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2005. № 2. С. 68–76.
9. Янко-Хомбах В.В., Смынтына Е.В., Кадурич С.В. и др. Колебания уровня Черного моря и адаптационная стратегия древнего человека за последние 30 тысяч лет // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2011. № 2. С. 61–94.

The best beaches in Europe on the Anapa embankment need urgent replenishment with sand. The history of the development of the embankment and the paleogeographic situation of the region in the Late Quaternary suggest the presence of reserves of sand with similar mineral and mechanical composition on the adjacent shelf.

Забанбарк Алие

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва, e-mail:

azaban@ocean.ru)

Углеводородный потенциал основных осадочных бассейнов на континентальной окраине Юго-Восточной Африки

Zabanbark Alie

(Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Hydrocarbon potential of the principal sedimentary basins on the continental margin of South-East Africa

Ключевые слова: осадочные бассейны, континентальные окраины, нефть, газ, скопления, отложения, запасы, поисково-разведочные работы

Вдоль юго-восточной континентальной окраины Африки в глубоководье Индийского океана протягиваются осадочные бассейны, в которых открыты крупные газовые месторождения. Скопления газа в этом западном секторе Индийского океана оцениваются в 10–15 трил.м³. Формирование скоплений газа связаны с отложениями Кару, в которых залегают запасы каменного угля.

Открытия глубоководных газовых месторождений в юго-западной части Индийского океана превратили эту Африканскую окраину в одно из мест активного проведения поисково-разведочных работ на нефть и газ. Осадочные бассейны и суббассейны протянуты вдоль всей континентальной окраины юго-восточной Африки от Сомали, Кении до Танзании, Мозамбика и западного побережья Мадагаскара. С севера на юг представлены следующие осадочные бассейны: Сомалийский, Ламу, Танзанийский, Ровума, который частично находится на юго-востоке Танзании, частично на северо-востоке Мозамбика, Мозамбикский, далее на юг на западной континентальной окраине острова Мадагаскар, с севера на юг идут бассейны: Амбилобе, Маджунга, Морондава, Мыс Святой Марии (рисунок). Здесь активно ведутся разработки на поиски углеводородов. Хотя, в этом регионе поисково-разведочные работы ведутся с 1950–1970 гг. с перерывами, однако, желаемых результатов они не достигали. Только с 2010 г., когда были открыты крупные газовые месторождения, как Лагоста, Мамба – Северное, Мамба – Южное и другие на северо-востоке акватории Мозамбика и в 2008 г. на юго-востоке Танзании, а также в пределах акватории были открыты крупные газовые месторождения, как Сонго-Сонго, Мнази-Бей, Киливани Северное-1 и другие, в регионе начались крупномасштабные работы на нефть и газ. Нужно отметить, что в основном в этом западном секторе Индийского океана исследования привели к открытию крупных скоплений газа, запасы которых оцениваются от 10 до 15 трил. м³.

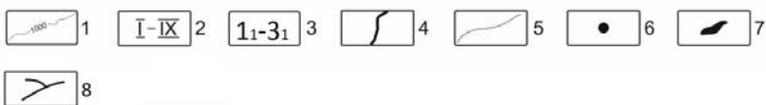
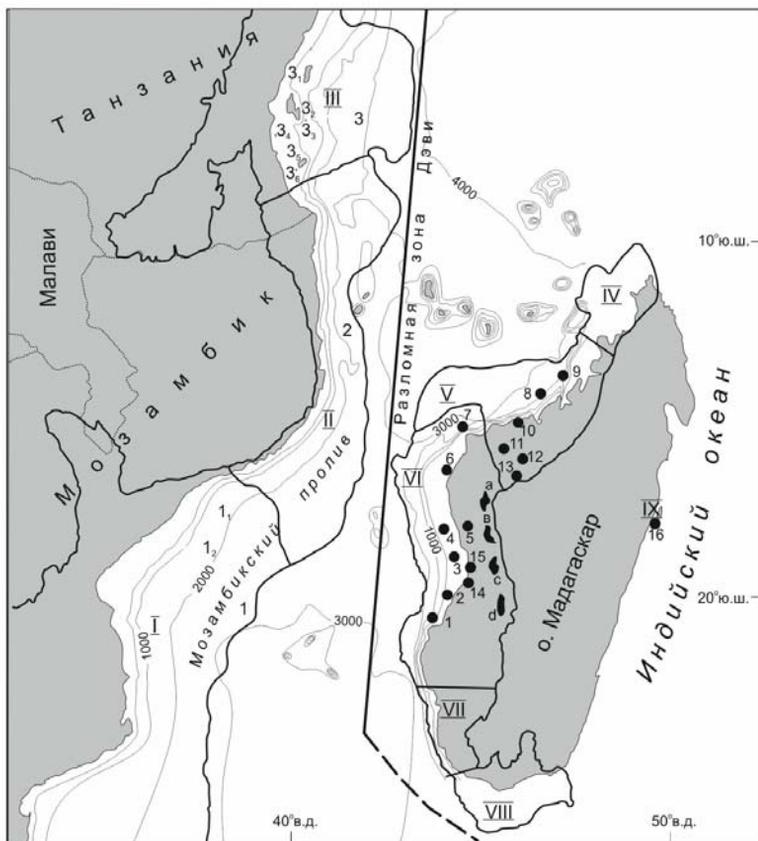


Рисунок. Схематическая карта размещения осадочных бассейнов и суббассейнов на континентальной окраине Юго-Восточной Африки.

Составлена с использованием материалов [1–8]. 1 – изобаты; 2 – названия осадочных бассейнов: I – Мозамбикский; II – Ровума; III – Танзанийский; IV – Амбилобе; V – Маджунга; VI – Морондава; VII – Морондава южный; VIII – Мыс Святой Марии (известен еще, как мыс Ромейн или мыс Вохимена); IX – Иль Сент Мари (или Таматаве); 3 – названия суббассейнов на континентальной окраине: 1₁ – Ангош, 1₂ – Замбези, 3₁ – Руву, 3₂ – Мафия, 3₃ – Мандава; 4 – разломная зона Дэви; 5 – государственная граница; 6 –

названия скважин: 1 – Моромбе – 1; 2 – Эпонж; 3 – Вауклузе – 1; 4 – Морондава-1; 5– Моноболо-1; 6 – Хелоизе-1; 7 – Честерфильд-1; 8 – Мариарано-1; 9– Махаджамба-1; 10 – Белобака; 11 – Тьюлери; 12 – Маравойя; 13 – Анкара; 14 – Саронанала-1; 15 – Серинам-1; 16 – Сент Мари-1(MAL-1); 7 – месторождения : а – Бемоланга; в – Тсимиоро; с – Манадаза; d – Dongara; 8 – границы бассейнов.

Крупные месторождения открыты и открываются в глубоководных регионах этих бассейнов и суббассейнов, то есть на континентальном склоне. Формирование газовых скоплений происходит за счет комплекса Кару, датированного пермо-триасом и протягивающегося от ЮАР вдоль всей Юго-Восточной континентальной окраины Африки [8, 9] Комплекс Кару содержит мощные запасы каменного угля. Однако, нужно отметить, что полный разрез формации Кару известен только в бассейне Кару, в ЮАР, занимающий 5-ое место в мире по запасам угля. Тренд комплекса Кару юго-запад–северо-восток. По мере продвижения на северо-восток, этот комплекс постепенно редуцирует не только по мощности, но также и по запасам каменного угля. Уже на северо-востоке Танзании месторождений газа не найдены, зато появляются скопления нефти. Жидкие углеводороды отмечаются в бассейнах Ламу и Сомалийском. Также известны скопления нефти на западной континентальной окраине острова Мадагаскар в бассейнах Морондава, Маджунга на суше и по сейсмическим разрезам, в глубоководных районах, до разломной зоны Дэви, в Мозамбикском канале, где отмечаются крупные антиклинальные складки, в которых ожидается скопления нефти.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nhabanga O., Ringose P. Use of rock- physics analysis of well logs to determine compaction history of Cretaceous shales in the Rovuma basin, offshore Mozambique // *Geophysical prospecting*. 2021. V. 69. № 1. P. 1–13.
2. Passive continental margin basin evolution and giant gas discoveries in offshore East Africa. Poster. / G. Zhang, Z. Wen, Z. Wang et al. AAPG International Conference and Exhibition. Istanbul, Turkey. 2014. September 14–17.
3. Catuneanu O., Wopfner H., Eriksson P. G. et al. The Karoo basins of South-Central Africa // *J. of African Earth Sciences*. 2005. № 43. P. 211–253.
4. Davidson I., Steel I. Geology and hydrocarbon potential of the East African continental margin: a review // *Published by the Geological Society of London for GSI. And EAGE. Petroleum Geoscience*. 2017. 36 p.
5. Mahanjane E., Franke D., Lutz R. et al. Maturity and petroleum systems modelling in the offshore Zambezi Delta depression and Angoche basin, northern Mozambique // *Journal of petroleum geology*. 2014. V. 37. № 4. P. 329–348.
6. Wen Zh., Wang Zh., Song Ch. et al. Structural architecture differences and

petroleum exploration of passive continental margin basins in east Africa // Petroleum exploration development. 2015. V. 42 (5). P. 733–744.

7. PJ Exploration Ltd. Geological evolution and hydrocarbon plays of Madagascar (with Occasional reference to Australia). Site - Z_MadagascarPESA_12_6_09pdf. <http://pj-exploration.co.uk>

8. Забанбарк А., Конюхов А.И., Лобковский Л.И. Формирование газовых скоплений на Юго-Восточной Африканской континентальной окраине // Океанология. 2023. Т. 63. № 3. С. 475–481.

9. Забанбарк А., Лобковский Л.И. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности континентальной окраины Мозамбика // Океанология. 2024. Т. 64. № 3. С. 476–484.

For the space of the long of South – East African continental margin sedimentary basins extent. Large fields of gas are discovered in the deepwater part of the Indian Ocean. The reserves of gas are estimated 10–15 trillion m cu. The formation of gas is related to the Karoo sediments, in which occurred large reserves of coal.

Колесник О.Н.¹, Колесник А.Н.¹, Карабцов А.А.², Съедин В.Т.¹, Рашидов В.А.³, Долгая А.А.³, Азаров И.В.⁴, Максеев Д.С.¹

(¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: kollesnik_o@poi.dvo.ru; ²Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток; ³Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; ⁴Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток)

Никель в рудных корках Охотского моря

Kolesnik O.N.¹, Kolesnik A.N.¹, Karabtsov A.A.², S'edin V.T.¹, Rashidov V.A.³, Dolgaya A.A.³, Azarov I.V.⁴, Makseev D.S.¹

(¹V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok; ²Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok; ³Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky; ⁴Far Eastern Federal University, Vladivostok)

Nickel in ore crusts of the Sea of Okhotsk

Ключевые слова: стратегические металлы, никель, рудные корки, Охотское море

На основе анализа литературных и собственных данных по распределению никеля в рудных корках Охотского моря выделен “центральный” район, перспективный для дальнейших исследований, с корками мощностью до 20 см и содержанием в них никеля до 2.6 мас. %.

Никель внесен в национальный список основных видов стратегического минерального сырья [4]. Соответственно, изучение этого металла является приоритетным. Перспективным источником никеля в океане считаются железомарганцевые образования (ЖМО), представленные конкрециями и корками.

Среди морей России Охотское море характеризуется довольно широким распространением рудных корок. Наиболее актуальное обобщение по этой теме сделано П.Е. Михайликом [2].

Цель нашей работы – оценить степень изученности вопроса по распределению никеля в ЖМО Охотского моря. В докладе будут представлены результаты этой оценки. В ходе работы анализировались все доступные опубликованные данные, а также неопубликованные данные, полученные нами при изучении пяти образцов рудных корок с поднятия Академии Наук в центральной части Охотского моря. Эти корки были драгированы в 1996 г. в 27-м рейсе НИС “Академик М.А. Лаврентьев” (станция LV98-19, интервал драгирования – 1500–1300 м) и до недавнего времени хранились в коллекции каменного материала ТОИ ДВО РАН. В результате обобщения имеющейся информации выделен “центральный” район, перспективный для дальнейших исследований. В его пределах отмечены рудные корки мощностью до 20 см с содержанием никеля до 2.6

мас. %. По содержанию никеля корки “центрального” района фактически конкурируют с такими океанскими рудами, как кобальтоносные марганцевые корки подводных гор и гайотов и железомарганцевые конкреции абиссальных котловин (средние значения по Тихому океану 0.4–0.5% и 0.97% соответственно) [3]. Есть предположение, что сверхвысокое содержание никеля в рудных корках “центрального” района Охотского моря может быть обусловлено “биогенностью” металла, его ассоциацией в морской воде с фосфором и кремнием, а также высокими темпами биокремнистой седиментации в регионе [2]. “Закрепление” никеля в корках происходит, очевидно, в результате сорбции на гидроксидах марганца. Вывод подтверждается результатами последовательного селективного выщелачивания, согласно которым практически весь никель сосредоточен в марганцевой оксидной фазе [1].

Работа выполнена по госбюджетной теме НИР ТОИ ДВО РАН, рег. № 124072000018-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова Ю.М., Михайлик П.Е., Михайлик Е.В., Зарубина Н.В., Блохин М.Г. Вещественный состав и условия формирования железомарганцевых корок хребта Зонне (Курильская котловина, Охотское море) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 9. С. 1292–1309.
2. Михайлик П.Е. Железомарганцевые корки северной части Тихого океана и прилегающих дальневосточных морей: строение, состав и условия формирования. Дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 1.6.10. Владивосток, 2024. 314 с.
3. Оганесян Л.В., Мирлин Е.Г. Минерально-сырьевые ресурсы твердых полезных ископаемых Мирового океана: современные реалии и потенциал рудоносности // Океанологические исследования. 2023. № 51 (4). С. 52–89.
4. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 30 августа 2022 г. № 2473-р.

Based on the analysis of literary and our own data on nickel distribution in ore crusts of the Sea of Okhotsk, a “central” region, promising for further research, with crusts up to 20 cm thick and a nickel content of up to 2.6 wt. % is outlined.

Лыгина Т.И., Миноранский Д.Е., Пономарева И.Н.

(ГНЦ АО «Южморгеология», г. Геленджик, e-mail: LyginaTI@rusgeology.ru)

**Подготовка Российского разведочного района
железомарганцевых конкреций к освоению: результаты
разведочных работ**

Lygina T., Minoranskiy D., Ponomareva I.N.

(SSC JSC «Yuzhmorgeologiya», Gelendzhik)

**Preparation of the Russian Exploration Area of Polymetallic
Nodules for Development: Exploration Results**

Ключевые слова: железомарганцевые конкреции, Российский разведочный район, Тихий океан, зона Кларион-Клиппертон

В рамках подготовки к освоению месторождения железомарганцевых конкреций, локализованного в пределах Российского разведочного района, на площади первого 5-летнего блока добычного района выполнены геологоразведочные работы разведочной стадии и экологические исследования, оконтурена рудная площадь, изучены горно-геологические условия ее локализации, получены новые геологические данные и фоновые характеристики морской среды.

Российский разведочный район железомарганцевых конкреций (РРР-ЖМК) площадью 75 000 км², расположенный в восточной части Тихого океана в зоне Кларион-Клиппертон, состоит из двух полигонов – Западного площадью 13800 км² и Восточного площадью 61200 км². Контракт на разведку полиметаллических конкреций в районе продолжительностью 5 лет заключен между Международным органом по морскому дну (МОМД) и предприятием «Южморгеология» (от имени России) 29 марта 2001 г. После завершения контрактного срока в 2016 г. с МОМД заключены два Соглашения на 5-летнее продление Контракта общим сроком 10 лет (до 29 марта 2026 г.).

За прошедшее время на всей площади Разведочного Района силами ГНЦ «Южморгеология» выполнены комплексные площадные поисково-разведочные (оценочные) работы м-ба 1:200 000, в том числе с целью локализации и оценки прогнозных ресурсов железомарганцевых конкреций категории Р₁. В качестве наиболее перспективной части Разведочного района выбран его Восточный полигон. На его площади по итогам оценочных работ оконтурены рудные залежи, изучена структура месторождения и выделен первый 5-летний блок будущего добычного района, состоящий из двух участков – северного и южного, общей площадью 5100 км².

В 2017 г. на северном участке первого 5-летнего добычного блока начаты ГРП следующей, разведочной стадии. К настоящему времени площадные разведочные работы проведены на четырех смежных полигонах

общей площадью 2 740 км² (рис. 1).

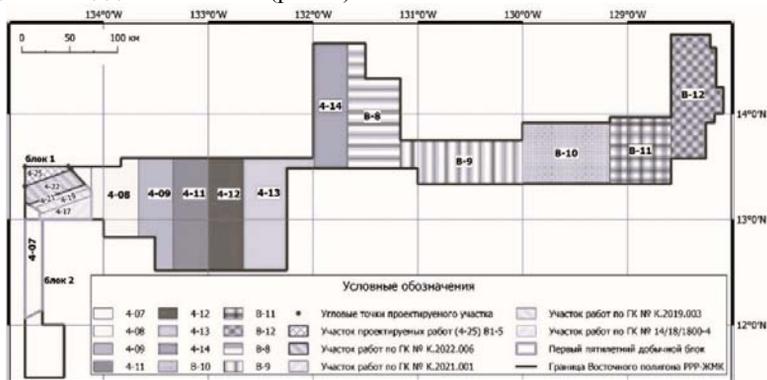


Рис. 1. Положение участков ГРП разведочной стадии на площади Восточного полигона PPP-ЖМК. На участках 4-07, 4-08, 4-09, 4-11, 4-12, 4-13, 4-14 проведены оценочные работы с целью локализации и оценки прогнозных ресурсов ЖМК категории P_1 ; на участках 4-17, 4-19, 4-21, 4-22, 4-25 – работы разведочной стадии

ГРП разведочной стадии выполнялись в рамках четырех Государственных контрактов: № 14/18/1800-4, № К.2019.003, № К.2021.001 и № К.2022.006. В сентябре 2025 г. начаты разведочные работы по ГК № К.2025.005 на участке площадью 561 км², завершающие разведку северного участка первого 5-летнего блока.

Результаты разведочных работ. На всех пяти участках используется единый технико-технологический комплекс, включающий следующие виды и методы работ:

- батиметрическая съемка придонным многолучевым эхолотом совместно с геоакустическим профилированием с использованием комплекса «МАК-Рельеф» производства АО «Южморгеология». В состав комплекса входят придонный МЛЭ с шириной полосы съемки 600 м, гидролокатор бокового обзора в режиме средней дальности (34 кГц) с диапазоном обзора ГБО 750 м на каждый борт и акустический профилограф (4 кГц). Съемка проводится по единой системе профилей СВ направления с межпрофильным расстоянием 500 м, с получением монтажей сонограмм с 50% перекрытием, полностью закрывающих изученную площадь записью с каждого борта ГБО;

- фототелепрофилирование с использованием цифрового ФТК «Нептун-Ц-О» производства АО «Южморгеология». Съемка проводится по системе профилей СВ направления с межпрофильным расстоянием 1000 м, межкадровым расстоянием 20–25 м, площадью сфотографированного участка дна не менее 2.5 м, с получением видеозаписи и цифровых фотографий морского дна с разрешением 5184×3456 пикселей;

- рядовое геологическое опробование рудных залежей ЖМК коробчатым пробоотборником, оснащенным фотоустановкой ГФУ-6С, по сети 3×3 км с доведением плотности рядового опробования в пределах рудного контура до 1 станции на 9 км^2 ;

- инженерно-геологическое опробование прямооточной грунтовой трубкой и скальной драгой с целью получения характеристик инженерно-геологических условий разработки месторождения.

Основные результаты разведочных работ, полученные к настоящему времени на площади четырех участках, сводятся к следующему.

Для всей закартированной площади:

- получена кондиционная батиметрическая основа масштаба $1 : 50\,000$, при этом закартированы элементы рельефа дна с уклонами, превышающими 6° при относительном перепаде глубин в первые десятки сантиметров. Рельеф дна месторождения изучен с детальностью, достаточной для проектирования добычного комплекса и планирования добычных работ;

- уточнены контуры, условия залегания, особенности внутреннего строения, характеристики изменчивости геолого-промышленных параметров рудных залежей;

- детально изучены горно-геологические и в том числе инженерно-геологические условия эксплуатации месторождения ЖМК на площади изученного участка;

- выделены эксплуатабельные участки (блоки) на оконтуренной площади;

- выполнен подсчет запасов руды (ЖМК) и основных металлов (Mn, Ni, Cu, Co) в соответствии с Российской классификацией по категориям C_1 и C_2 и в соответствии с требованиями МОМД, по категориям, предусмотренным шаблоном CRIRSCO: «измеренные» ресурсы (Measured mineral resources) и «выявленные» ресурсы (Indicated mineral resources);

- по каждому участку подготовлены комплекты геологических, в т.ч. графических материалов в м-бе $1:50\,000$, содержащие результаты разведочных работ.

В итоге по результатам разведочных работ, выполненных к настоящему времени на четырех участках, с высокой степенью обоснованности и достоверности оконтурена рудная площадь, представляющая собой участок гигантской рудной залежи плащеобразного типа, в пределах которой расположен первый 5-летний блок добычного района.

Оконтуренная рудная площадь находится в простых горно-геологических условиях, на пологой поверхности дна с углами наклона не более 6° , осложненной единичными донными препятствиями, представляющими собой неглубокие и непротяженные линейные впадины в осевых частях впадин и мелкие воронкообразные впадины различной геоморфологической приуроченности глубиной в первые метры. Залесь локализована в интервале глубин от 4650 до 4900 м и приурочена к

участкам дна, сложенным кремнисто-глинистыми осадками первого (покровного) инженерно-геологического комплекса (рис. 2).

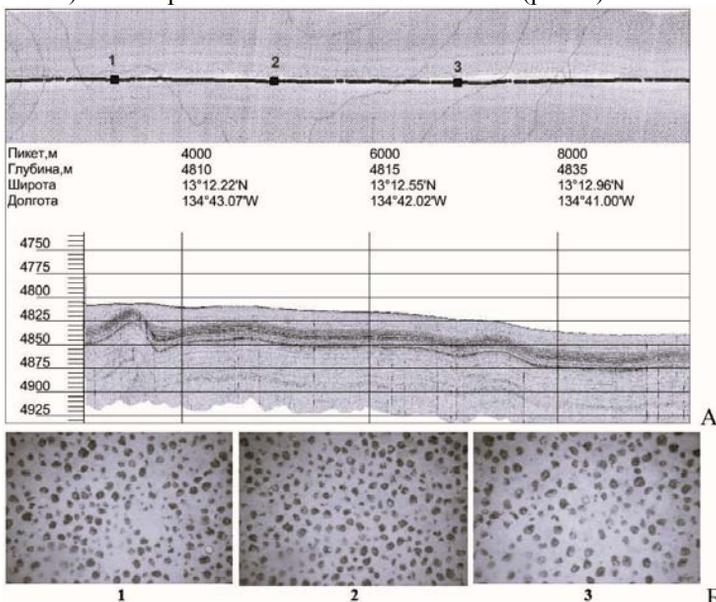


Рис. 2. Пример благоприятных ГГУ на рудной площади.

А – геоакустический профиль 422_26MR с наложенным фотопрофилем 422_26F; Б – фотокадры фотопрофиля 422_26F (положение фотокадров показано на сонограмме). Залезь на сонограмме показана крапом

По сравнению с результатами проведенных ранее оценочных работ, рудная площадь на изученном участке уменьшилась на 13% (с 1920 до 1670 км²), средняя весовая концентрация руды (плотность залегания) увеличилась на 8% (с 16.7 кг/м² до 18.0 кг/м²), ресурсы Р₁ переведены в запасы С₁+С₂. Рудная площадь сложена высокомарганцовистыми конкрециями природной разновидности С крупного и среднего размера (рис. 2) со средними содержаниями основных рудных компонентов 30.46% Mn, 1.50% Ni, 1.19% Cu, 0.24% Co и попутных элементов 590 г/т молибдена и 902 г/т суммы РЗЭ.

Оценка фоновых экологических параметров морской среды. Помимо полученных результатов геологоразведочных работ, на изученном участке, в соответствии с Контрактом на разведку ЖМК, оценены фоновые экологические характеристики. В рамках этих исследований получены следующие результаты:

- выполнены гидрометеорологические наблюдения в районе месторождения;

- измерены параметры течений на автономных буйковых станциях, станциях вертикального гидрозондирования (ВГЗ) и на профилях;
- изучены гидрофизические и гидрохимические параметры водной толщи на профилях и станциях ВГЗ;
- изучены геологические, физические и химические свойства донных осадков на станциях опробования боксорером и грунтовой трубкой;
- изучены гидрохимические параметры поровых вод донных осадков на станциях опробования боксорером;
- выполнен спутниковый мониторинг изменчивости океанографических параметров содержания хлорофилла-а и температуры воды поверхности океана;
- исследован видовой состав и характер распространения бентосной мега-, макро- и мейофауны, эпи- и инфауны конкреций, даны характеристики пелагических сообществ бактериопланктона, зоопланктона и фитопланктона.

Перспективы разведочных работ. Геологоразведочные работы выполняются в рамках проектной части «Геология: возрождение легенды» государственной программы «Воспроизводство и использование природных ресурсов» и проводятся по государственным контрактам, заключенным между АО «Росгео» и Департаментом Сезвапнедра. В 2025 г. в рамках этой программы контрактом АО «Южморгеология» начаты работы разведочной стадии на оставшемся фрагменте северного участка первого 5-летнего блока, завершение которых запланировано на 2027 г.

Для продолжения разведочных работ в сентябре текущего 2025 г., за полгода до конца второго продленного срока контрактной деятельности, подрядчиком АО «Южморгеология» (от лица Российской Федерации) подана Заявка на третье продление контракта с МОМД на следующие пять лет, т.е. до 29 марта 2031 г. В период третьего продления планируется провести разведку на южном участке первого 5-летнего блока (рис. 1).

В настоящее время подрядчиком АО «Южморгеология» проводятся работы по выбору и проектированию второго, третьего и четвертого 5-летних добычных блоков на РРР-ЖМК, а также проектирование объемов разведочных работ на площади каждого из выделенных 5-летних блоков.

В работе использованы геологические материалы, полученные по государственным контрактам № 14/18/1800-4, К.2019.003, К.2021.001, К.2022.006, К.2025.005.

In preparation for the development of the ferromanganese nodule deposit located in the Russian exploration area, exploration stage of geological surveys and environmental studies were carried out in the area of the first 5-year block of the future mining district. The ore area was delineated with a high degree of validity and reliability, the mining and geological conditions of its location were studied, new geological data and background characteristics of the marine environment were obtained.

Лысенко В.И.^{1,2}

¹Филиал ФГБОУВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» в г. Севастополь, г. Севастополь, e-mail: niagara_sev@mail.ru; ²ФГБНУ «Институт природно-технических систем», г. Севастополь)

Своеобразие многокомпонентного состава флюидов холодных сипов бухты Ласпи (Южный берег Крыма)

Lysenko V.I.^{1,2}

¹Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Lomonosov Moscow State University” in Sevastopol, Sevastopol; ²Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Natural and Technical Systems”, Sevastopol)

The uniqueness of the multicomponent composition of cold seep fluids in Laspi Bay (South Coast of Crimea)

Ключевые слова: метан, тяжелые углеводороды, азот, углекислый газ, гелий, водные растворы

Не постоянные объемы выбросов флюидов сипами сопровождались изменчивым составом газов. В них присутствуют CH_4 , C_2H_8 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_3H_6 , C_4H_{10} , iC_4H_{10} , nC_5H_{12} , iC_5H_{12} , CO_2 , O_2 , H_2 , H_2S , N_2 , COS и CS_2 . По данным гидрохимического опробования флюиды сопровождаются опресненными водными растворами с повышенными концентрациями Br, B, Sr, Si, Li, Mn, Se, As, Hg, Ti, Ga, Ge, As, Zr, Te, Cs, Ba, Th и U.

В бухте Ласпи выходы пузырьков газа из холодных сипов находятся на глубинах от 1.5 до 3.0 м, что позволяет исследовать динамику поступления объемов газа и изучить состав флюидов. Гряды бактериальных построек с их выходами приурочены к зоне пересечения Ласпинского и Берегового разломов [7]. Они приурочены к абразионному подводному береговому склону и находятся на незначительном удалении от современной береговой линии. Поступления пузырьков газа с поверхности построек происходит из конусовидных отверстий диаметром 2.0–4.0 мм [7].

За двадцатилетний период наблюдения на поверхности построек в разные временные периоды наблюдалось от 8 до 20 точек выбросов газа. Иногда отдельные выходы газа прекращали свою деятельность, но через некоторое время рядом образовывался новый источник поступления флюидов.

Измерения объемов выбросов газа с помощью мерной посуды выполнялись в 2019, 2021, 2022, 2023, 2024 и 2025 гг. По результатам наблюдений установлено, что объемы выбросов газа в отдельных точках изменялись в течение нескольких минут, часа, суток и года. На объемы поступления флюидов не оказывали влияния незначительных изменений температуры воды при проведении наблюдений. Дебит выходов пузырьков газа отдельных сипов изменялся от 2.6 до 37.6 мл/мин (3.7–54.4 л/сут).

При отборе первых проб на состав флюидов в июле 2014 г., газ

набирался в пятилитровую емкость. Время отбора составляло от 35 до 50 мин. Из нее под водой газ отбирался в пол литровые бутылки. Позднее для этой цели было сконструировано специальное оборудование, которое позволяло отобрать газ в 2.0 см от выхода сипа в флакон объемом 100 мл в течение 10–15 мин. Результаты анализов проб, отобранных за разный временной период, характеризуются значительным различием по содержанию состава газов. В пробах, в которых отбор газа осуществлялся за 35 и 45 мин., содержание метана было от 81.9 до 91.9%. В других, отобранных за 10–15 мин., концентрация метана изменялась от 54.5 до 61.9%.

В 2022, 2023 и 2024 гг. отбор проб газа осуществлялся по старой методике флаконами объемом 100 мл течении 3–15 мин. Анализ на состав газов выполнялся в лаборатории МГУ на стационарных газовых хроматографах «Хроматэк-Кристалл 5000». Всего было проанализировано 20 анализов.

Непостоянные объемы выбросов газов из сипов в бухте Ласпи характеризуются переменным газовым составом флюидов. Его состав был непостоянным даже в течение нескольких минут. Во флюидах преобладали концентрации углеводородных газов. Главным компонентом являлся метан (55.74–61.18%). Общая сумма в пробах C_2H_8 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_3H_6 , C_4H_{10} , iC_4H_{10} , nC_5H_{12} и iC_5H_{12} не превышала 1.5%. Дополнительными компонентами во флюидах являются азот (9.6–40.1%), кислород (0.27–8.9%), углекислый газ (0.099–0.37%), гелий (0.292–1.189%), водород (3.12–6.33ppm), сероводород, (0.13ppm), карбонилсульфид (0.042–0.081ppm) и сероуглерод (0.162–4.125ppm).

Не постоянство объемов выбросов и состава, а также присутствие во флюидах сипов бухты Ласпи CO_2 , CH_4 , H_2 , H_2S , N_2 , COS , CS_2 и He подтверждает их связь с глубинными процессами. Подобный состав газов было установлен при изучении газовых включений в гераклитах, кварцевых и кальцитовых жилах ряда месторождений [9, 10]. Возможно, формирование флюидов бухты Ласпи происходило и происходит в нижних горизонтах осадочной толщи на границе с магматическими породами. Присутствие сероводорода, а также преобладания высоких содержаний CH_4 , и N_2 над концентрациями O_2 и CO_2 во флюидах, свидетельствуют о восстановительной среде вблизи сипов и бактериальных постройках бухты Ласпи [9].

Несколько неожиданным было присутствие в пробах флюидов бухты Ласпи содержаний кислорода. Подобные его содержания совместно с метаном исследователи отмечали в пробах газов из гидротермальных источников подводного вулкана Пийпа и Аджи – Су (Черные воды) [1]. Вероятно, на значительных глубинах существуют условия для реакции разложения воды или высвобождение кислорода из кристаллических решеток минералов. Впервые глубинную природу образования кислорода в

атмосфере обосновал Ф.А. Летников [6]. По его расчетам при переходе одного куба базальтов в граниты в пространство выделяется от 50 до 130 кг кислорода. Горный Крым является молодой структурой, в которой, возможно, происходит рост гранитного слоя земной коры за счет базальтовой [6].

Флюиды бухты Ласпи по многообразию газов имеют некоторую разницу от схожих выделений холодных сипов Черного моря и грязевых вулканов [5, 10]. По результатам опробования струй флюидов на северо-западном шельфе, в их состав входили следующие газы: метан (98.7%), тяжелые углеводороды (0.15%), азот (1.05%), углекислый газ (0.077%). При сжигании пробы газов чувствовался запах сероводорода. Похожие содержания метана (94.9–99.0%), азота (0.17–5.10%), углекислого газ (0.00–0.90%) и водорода (0.00–0.25%) были в анализах из сипов Днепровского каньона [5, 10]. При этом исследователи отмечали, что пробы, отобранные на большей глубине, характеризуются более высокими содержаниями в них метана [5]. Как можно объяснить высокие концентрации метана в пробах, отобранных на больших глубинах? Автор полагает, что это объясняется методикой опробования. Для взятия проб на больших глубинах использовалось пробоотборник объемом около литра или больше. Процесс отбор газа занимал существенный интервал времени. За этот временной период в пробоотборнике происходило разделение смеси газа по весу, а часть его растворялась в воде. Поскольку материал для анализа брали из верхней части емкости, то в нее попадал в основном метан. Подобные результаты были у авторов при взятии первых проб большими емкостями в 2014 г. Отбор газа занимал от 35 до 50 мин., а содержания метана в анализах изменялось от 81.9 до 91.9%. Наблюдалась зависимость, чем больше время опробования, тем выше концентрации метана.

По результатам гидрохимической съемки дна бухты Ласпи установлено, что средняя соленость морской воды изменялась в интервале от 18.5 до 18.8‰. Нет значительных различий солености в центральной части бухты и береговой зоне, на которую опираются выходы оврагов с временными водотоками. Совсем другие результаты показали анализы воды, взятые из устьев сипов во время выбросов газа. У этих проб соленость изменялась от 7.5 до 16.7‰, что является доказательством присутствия во флюидах опресненных водных растворов. Их концентрация, возможно, несколько ниже, чем 7.5 г/л.

Водные растворы сипов бухты Ласпи по объемам выходов на поверхность и содержанию солей имеют много общего с сопочными водами грязевых вулканов Керченского полуострова и других регионов [10]. Необходимо отметить, что сипы с выбросами опресненных вод встречаются в глубоководной части Тихого океана и в южной котловине Каспийского моря [3, 8]. Некоторые исследователи и раньше высказывали предположение без доказательств, что выходы пузырьков газов на дне

Черного и Каспийского моря сопровождаются водным раствором [2, 4].

Водные растворы сипов отличаются от морской воды не только концентрацией солей, но также содержанием геохимических элементов. Это подтвердили результаты изучения геохимических проб водных растворов и морской воды. Анализы были выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) в лаборатории ФГБУН ФИЦ «Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН» на приборе Analytik Jena PlasmaQuant MS Elite. Были проанализированы две пробы водных растворов с разной соленостью (Л-51 – 8.55‰ и Л-52 – 9.29‰) и одна морской воды (Л-53 – 18.61‰), взятой на удалении от сипов.

Не смотря на низкие концентрации солей в водных растворах, содержание в них Br, B, Sr, Si, Li, Mn, Se, As, Hg, Be, Ti, Ga, Ge, As, Zr, Os, Pt, Au, Te, Cs, Ba, Bi, Th и U выше, чем в морской воде бухты Ласпи. В тоже время для морской воды бухты Ласпи характерны, по сравнению с анализами водных растворов флюидов, несколько повышенные содержания Al, Fe, Rb, Y, Mo, Sn, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, Pb и Hf.

Пробы растворов, из-за различных концентраций в них солей, отличаются друг от друга содержанием геохимических элементов. Как отмечалось выше, соленость является критерием разбавления водных растворов морской водой. Наблюдается закономерность содержания геохимических элементов от ее присутствия. Самые высокие концентрации Br, B, Sr, Si, Li, Mn, Se, As, Hg, Be, Ti, Ge, As, Os, Pt, Au, Bi, Th, и U характерны для пробы Л -51, в которой самые низкие содержания солей. Несколько ниже содержания этих элементов в пробе Л -52 и совсем низкие концентрации их в анализах морской воды. Обратная зависимость присуща химическим элементам Fe, Rb, Y, Mo, Sn, Zn, Cu, Ni и Co. Самые высокие их концентрации присутствуют в морской воде, несколько ниже в пробе Л-52 и совсем низкие в анализе Л-51.

Результаты комплексных исследований подтвердили, что флюидные потоки холодных сипов в бухте Ласпи имеют глубинную природу образования. Они имеют многокомпонентный газовый состав с присутствием холодных водных растворов. Их эндогенный генезис подтверждают следующие признаки: приуроченность их выходов к зоне пересечения разломов; периодичность и пульсирующий характер извержений; непостоянство объемов выбросов и состава газов; присутствие CH_4 , C_2H_8 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_3H_6 , C_4H_{10} , $i\text{C}_4\text{H}_{10}$, $n\text{C}_5\text{H}_{12}$, $i\text{C}_5\text{H}_{12}$, CO_2 , O_2 , H_2 , H_2S , N_2 , COS и CS_2 .; тяжелый изотопный состав углерода; наличие водных растворов с повышенными содержаниями геохимических элементов.

В результате исследований процессов дегазации в бухте Ласпи установлено, что флюиды имеют многокомпонентный газовый состав и сопровождаются водными растворами. Поступления газовых и водных флюидов со дна Мирового океана оказывают влияние на эволюционное изменение состава атмосферы и гидросферы. Низкие скорости

преобразования атмосферы и гидросферы позволяют флоре и фауне приспособиться к новым физико – химическим обстановкам существования жизни на Земле.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПТС № госрегистрации 124020100120-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альбов С.В. Самулева В.И. Районирование и характеристика минеральных вод / Гидрогеология СССР. Т. 8. Крым. М.: Недра, 1970. С. 263–276.
2. Безродных Ю.П., Делия С.В., Лаврушин В.Ю. и др. Газовые сипы на акватории северного Каспия // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 5. С. 415–425.
3. Вишняков А.Э., Горяинов И.Н., Грамберг И.С. Выходы аномально распресненных вод на дне Тихого океана// Доклады АН СССР. 1990. Т. 311. № 4. С. 968–970.
4. Геворкьян В.Х., Бураков В.И., Исагулова Ю.К. и др. Газовыделяющие постройки на дне северо-западной части Черного моря // Докл. АН УССР. 1991. № 4. С. 80–85.
5. Леин А.Ю. Потоки метана из холодных метановых сипов Черного и Норвежского морей: количественные оценки // Геохимия. 2005. № 4. С. 438–453.
6. Летников Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 4. С. 291–307.
7. Лысенко В.И., Шик Н.В. Дегазация и "карбонатные постройки" в бухте Ласпи (ЮБК) // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. № 1. С. 110–122.
8. Мартынова М.А., Мартынова Г.И. О роли глубинного флюида в формировании инверсионных гидрохимических разрезов // Вестник ЛГУ. 1984. № 18. С. 78–82.
9. Наумов В.Б., Миронова О.Ф., Коваленкер В.А. и др. Магматический азот и его участие в эпитермальном рудообразовании // Докл. РАН. 1992. Т. 322. № 5. С. 973–976.
10. Шнюков Е.Ф., Коболев В.П., Пасынков А.А. Газовый вулканизм Черного моря. Киев: Логос, 2013. 383 с.

The non-constant volumes of fluid emissions by seeps were accompanied by a variable composition of gases. They contain CH_4 , C_2H_8 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_3H_6 , C_4H_{10} , $i\text{C}_4\text{H}_{10}$, $n\text{C}_5\text{H}_{12}$, $i\text{C}_5\text{H}_{12}$, CO_2 , O_2 , H_2 , H_2S , N_2 , COS and CS_2 . According to hydrochemical testing, the fluids are accompanied by desalinated aqueous solutions with increased concentrations of Br, B, Sr, Si, Li, Mn, Se, As, Hg, Ti, Ga, Ge, As, Zr, Te, Cs, Ba, Th and U.

**Люткевич А.Д.¹, Сахаров Б.А.¹, Дара О.М.², Габлина И.Ф.¹,
Добрецова И.Г.³, Кулаженок М.Н.³**

(¹ГИН РАН, г. Москва, e-mail: nastya.lyutkevich@mail.ru; ²Институт океанологии им. П.П. Ширишова РАН, г. Москва; ³АО «ПМГРЭ», г. Ломоносов)

Смешанослойные глинистые минералы осадков гидротермального поля Пюи де Фоль (САХ)

**Lyutkevich A.D.¹, Sakharov B.A.¹, Dara O.M.², Gablina I.F.¹,
Dobretsova I.G.³, Kulazhenok M.N.³**

(¹GIN RAS, Moscow; ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow; ³SV PMGE, Lomonosov)

Mixed-layered clay minerals from sediments of the Puy de Folles hydrothermal field (MAR)

Ключевые слова: смешанослойные глинистые минералы, Срединно-Атлантический хребет, гидротермальное поле Пюи де Фоль

В рейсе № 46 (2023 г.) НИС «Профессор Логачев» при детальном изучении осадочного чехла гидротермального рудного поля Пюи де Фоль была впервые поднята колонка осадка, нехарактерного для данного сектора САХ буровато-зеленого цвета. Комплекс проведенных исследований позволил установить минеральный состав основной массы осадка как смешанослойный глауконит-нонтронитовый, с увеличением слюдистого компонента к забюю колонки. Изучение процесса формирования данных отложений важно для понимания условий современного рудообразования в океане.

Подводный вулкан Пюи де Фоль, расположенный на осевом поднятии на территории Российского Разведочного Района (PPP САХ), возвышается над дном рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта на 1800 м [1]. В кальдере вулкана расположено одноименное гидротермальное поле, границы и рудные тела которого, а также подстилающие породы были установлены и изучены в рейсе № 31 НИС «Профессор Логачев» в 2008 г. [2]. За центр рудного поля Пюи де Фоль, расположенного в интервале глубин 1940–2000 м, приняты координаты 20°30' с.ш. и 45°38' з.д.

Около 75–80% площади рудного поля равномерно покрывают бежевые биогенные карбонатные осадки, мощностью не более 1 метра, представленные птероподовыми, кокколито-фораминиферовыми илами и содержащие темные осколки вулканического стекла размером до первых сантиметров. На поверхности осадка локально развиты рудные тела, сложенные сульфидными рудами, гидроксидно-железистыми корками, интенсивно опализированными рудными образованиями. Сульфидные руды представлены цинково-медно-колчеданным (Zn-Cu-Fe) и серноколчеданным (Fe-S) типами. Вблизи рудных тел отмечены бескарбонатные глинистые буровато-зеленого металлоносные осадки. Подстилающими породами

рудного поля Пюи де Фоль являются базальты.

В результате телепрофилирования и дальнейшего пробоотбора гидравлическим грейфером на станции 46L036g были отобраны колонка мощностью 52 см неопisanного ранее в данном секторе САХ осадка буровато-зеленого цвета и нарушенный осадок в непосредственной близости от колонки. Верхний слой (0–9 см), включающий в себя большое количество обломков гидроксидно-железистых корок, вероятно, сложен фрагментами разрушенной при отборе постройки и исключен из дальнейшей интерпретации. Минеральный состав основной буровато-зеленой массы осадка с помощью иммерсионного микроскопа на судне был диагностирован как глауконитовый, а последующие исследования с использованием более точных методов позволили уточнить его как глауконит-нонтронитовый.

Глубоководные глауконит-нонтронитовые образования в океане были известны исследователям ранее [3, 4], однако на территории PPP САХ установлены впервые. Для понимания условий и механизма формирования данных отложений, возможной связи с оруденением, вулканической и гидротермальной деятельностью были проведены дальнейшие лабораторные исследования, позволившие уточнить полученные на судне данные.

Отобранный материал был изучен комплексом методов: оптическая и электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ валового состава осадка и глинистой фракции размером <0.001 мм. Выделение глинистой фракции проводилось для 5 образцов (интервалы колонки 0–9, 9–17, 17–27, 27–37, 37–50 см) с использованием седиментационного метода [5]. Рентгенодифрактометрическая съемка проводилась на дифрактометрах Bruker D8 (ГИН РАН и ИО РАН) с напряжением 40 кВ и током 40 мА.

Анализ порошковых дифрактограмм, полученных по валовым образцам осадка, позволяет охарактеризовать их как смешанослойные слюда-сметитовые образования [4], с сульфидами, а также ярозитом в нижних горизонтах колонки (27–50 см). Качественный анализ дифрактограмм ориентированных препаратов глинистой фракции (<0.001 мм) показал, что данные образцы преимущественно сложены смешанослойным слюда-сметитовым минералом (по нецелочисленной серии базальных отражений в природном и насыщенном этиленгликолем состояниях и типичной дифракционной картине после прокаливания при 550°C) с небольшой примесью каолинита, пирита (иногда и ярозита) и некоторого количества аморфной фазы (палагонита?).

Более детальное изучение смешанослойных слюда-сметитовых минералов проводилось с использованием метода моделирования экспериментальных дифракционных картин, который является наиболее достоверным подходом для получения информации об их структуре и количественном содержании в образцах [6].

Применение данного метода к изученным образцам показало, что они представлены фактически одной смешанослойной фазой, в структуре которой почти неупорядоченно чередуются слюдистые и смектитовые слои, с небольшой примесью каолинита (1–3%). Примерно равное соотношение катионов (Al+Mg) и Fe в 2:1 октаэдрах свидетельствует о глауконит-нонтронитовой структуре минералов [6]. Кроме того, в структуре глауконит-нонтронитов из нижней (27–50 см) и верхней (0–9 см) частей разреза существенно увеличивается содержание слюдистого компонента, примерно на 20%, по отношению к образцам из средней (9–27 см) его части.

Принимая во внимание содержание аморфной фазы (палагонита?) и разделяя средние кристаллохимические формулы на слюдистый и смектитовый компоненты согласно соотношению слоев, полученному моделированием дифракционных картин, были рассчитаны индивидуальные формулы слюдистых и смектитовых слоев в образцах из интервалов 17–27 см и 37–50 см, оказавшиеся близкими между собой, что свидетельствует о едином исходном материале, по которому формировались эти минералы (таблица).

Таблица. Рассчитанные кристаллохимические формулы по данным микрозондового анализа.

	17-27 см (W _{сл} : W _{см} = 0.32 : 0.68)	37-50 см (W _{сл} : W _{см} = 0.52 : 0.48)
Общая формула	$\begin{matrix} (\text{Ca}_{0.03} \text{Mg}_{0.09} \text{K}_{0.21}) \\ (\text{Al}_{0.12} \text{Mg}_{0.34} \text{Fe}_{1.53} \text{Ti}_{0.01}) \\ (\text{Si}_{3.89} \text{Al}_{0.11}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (\text{Ca}_{0.05} \text{Mg}_{0.04} \text{K}_{0.38}) \\ (\text{Al}_{0.10} \text{Mg}_{0.38} \text{Fe}_{1.52}) \\ (\text{Si}_{3.80} \text{Al}_{0.20}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$
Смектитовый компонент	$\begin{matrix} (\text{Ca}_{0.04} \text{Mg}_{0.12}) \\ (\text{Al}_{0.12} \text{Mg}_{0.34} \text{Fe}_{1.53} \text{Ti}_{0.01}) \\ \text{Si}_{4.00} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} (\text{Ca}_{0.10} \text{Mg}_{0.08}) \\ (\text{Al}_{0.10} \text{Mg}_{0.38} \text{Fe}_{1.52}) \\ \text{Si}_{4.00} \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$
Слюдистый компонент	$\begin{matrix} \text{K}_{0.68} (\text{Al}_{0.12} \text{Mg}_{0.34} \text{Fe}_{1.53} \text{Ti}_{0.01}) \\ (\text{Si}_{3.65} \text{Al}_{0.35}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} \text{K}_{0.74} (\text{Al}_{0.10} \text{Mg}_{0.38} \text{Fe}_{1.52}) \\ (\text{Si}_{3.62} \text{Al}_{0.38}) \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \end{matrix}$

Развитие смешанослойных глауконит-нонтронитов, придающих осадкам характерный зеленый оттенок, вероятно, происходит по осколкам

вулканического стекла в несколько стадий, однако единой точки зрения на механизм их формирования среди исследователей нет. В работе [7] указывается, что на начальном этапе гальмиролиза вулканических стекол происходит формирование гидратированной аморфной фазы «гель-палагонит», и последующее осаждение смектита. Процесс слюдизации смектита происходит в ходе дальнейших постседиментационных преобразований с накоплением калия из морской воды или влияния повышенного теплового потока с привнесом калия гидротермальным флюидом [3], в ходе которых либо смектитовые слои постепенно замещаются слюдистыми [8], либо происходит растворение смектитовых слоев с последующим формированием слюдистых слоев [9]. Нельзя исключать влияние бактериальной активности на всех этапах данного процесса [7, 10].

Таким образом, в данном секторе САХ впервые установлены глубоководные глауконит-нонтронитовые отложения. Дальнейшее изучение и интерпретация полученных результатов важны для понимания условий формирования нетипичных для осевой зоны САХ донных отложений, связанных, вероятно, с вулканической деятельностью и наложенными гидротермальными и бактериальными процессами.

Коллектив авторов выражает благодарность сотрудникам и руководству АО «ПМГРЭ» и АО «Росгеология», а также экипажу рейса № 46 НИС «Профессор Логачев» за возможность участвовать в рейсе и предоставленные материалы. Работа выполнена в соответствии с планами научных исследований ГИН РАН (тема № 123032400064-7) и ИО РАН им. П.П. Ширшова (тема FMWE-2024-0020).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силантьев С.А., Буйкин А.И., Гуренко А.А. и др. Геохимическая природа базальтов рифтовой долины САХ на $20^{\circ}31'$ с.ш.: условия образования аномального вулканического центра Пюи-де-Фоль в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта // Геохимия. 2024. Т. 69. № 11. С. 962–974.
2. Марков В.Ф., Самоваров М.Л., Сергеев М.Б. и др. Геолого-геофизические исследования с целью выделения участков, перспективных на ГПС, в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта (в пределах 19° – 21° с.ш.) и поисковые работы на участке $22^{\circ}30'$ с.ш. // Отчет 31-го рейса НИС «Профессор Логачев». Ломоносов. ФГУНПП ПМГРЭ. 2009.
3. Курносов В.Б. Глинистые осадки главных структурных элементов окраин Тихого океана (по материалам глубоководного бурения). М.: Наука, 1982. 224 с.
4. Ivanova E., Borisov D., Murdmaa I. et al. Litho- and chronostratigraphy of the Upper Quaternary sediments from the Piedra Buena Terrace, Patagonian

Continental Margin (SW Atlantic) // *Marine and Petroleum Geology*. 2024. V. 165. 106894. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.106894>

5. Фролов В.Т. Руководство к лабораторным занятиям по петрографии осадочных пород // М.: Изд-во Московского Университета, 1964. 310 с.

6. Sakharov V.A., Lindgreen H., Salyn A.L., Drits V.A. Determination of illite-smectite structures using multispecimen X-ray diffraction profile modelling // *Clays and Clay Minerals*. 1999. V. 47. P. 555–566.

7. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: смектиты, смешанослойные образования. М.: Наука, 1990. 214 с.

8. Hower J., Eslinger E.V., Hower M. et al. The mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment. 1. Mineralogical and chemical evidence // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1976. V. 87. P. 725–737.

9. Boles J.R., Francks S.G. Clae diagenesis in Wilcox sandstones of South-West Texas: implications of smectite diagenesis on sandstone cementation // *J. Sediment. Petrol.* 1979. V. 49. P. 55–70.

10. Baldermann A., Warr L.N., Grathoff G.H. and Dietzel M. The rate and mechanism of deep-sea glauconite formation at the Ivory Coast-Ghana marginal ridge // *Clays and Clay Minerals*. 2013. V. 61. № 3. P. 258–276.

During cruise 46 (2023) of the r/v *Professor Logachev*, during a detailed study of the sedimentary cover of the Puy de Folles hydrothermal ore field, a sediment column of a brownish-green color, uncharacteristic for this sector of the MAR, was raised for the first time. The complex of studies carried out made it possible to establish the mineral composition of the bulk of the sediment as mixed-layer glauconite-nontronite, with an increase in the micaceous component towards the bottom of the column. The study of the formation process of these deposits is important for understanding the conditions of modern ore formation in the ocean.

Мальцева К.П., Петров В.А.

(ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, e-mail: ksenmal279@yandex.ru)

Влияние гидротермальной активности на петрографо-геохимические характеристики базальтов (16°–21° САХ)

Maltceva K.P., Petrov V.A.

(FSBI «VNIIOkeangeologiya», St. Petersburg, e-mail: ksenmal279@yandex.ru)

Impact of hydrothermal activity on the petrographic–geochemical features of basalts (16°–21° MAR)

Ключевые слова: базальты, Срединно-Атлантический хребет, N-MORB

Приведены результаты изучения базальтов района САХ 16°–21° с.ш., разделенных на «фоновые» и «рудные». Петрографические между базальтами выражены слабо, однако по геохимическим данным «рудные» базальты обогащены K_2O , P_2O_5 , Zr, Nb и La. Применение факторного анализа позволило выделить сочетания признаков, отражающих как магматические процессы, так и влияние гидротермальных систем.

Район между 16°–21° с.ш. Срединно-Атлантического хребта (САХ) представлен преимущественно «базальтовыми» сегментами осевой зоны между трансформными разломами Зеленого мыса и Кейн, которые характеризуются относительно стабильным режимом спрединга и развитием типичных толеитовых базальтов N-MORB [1]. Образцы, отобранные в пределах участков с масштабным обнажением серпентинитов (вблизи 16°30' с.ш., 17°55' с.ш. и 20° с.ш.) в данной работе не использовались [2]. В пределах указанного района САХ расположено 9 известных гидротермальных полей. В этой связи исследование базальтов рассматриваемого участка САХ дает возможность сопоставить «фоновые» и «рудные» разновидности, выделить диагностические признаки их различий и проверить применимость статистических методов для их систематизации.

В работе использованы фондовые материалы АО «ПМГРЭ» и шлифы образцов базальтов, полученных в ходе рейсов научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Логачев». Все базальты были разделены на две категории в зависимости от пространственного расстояния от известных гидротермальных источников. «Фоновые» базальты находятся далеко от источников (>10 км) или в районе, где не было обнаружено гидротермальной активности. «Рудные» базальты расположены вблизи (<1 км) и в одной топографической единице с известными гидротермальными источниками. Всего было выделено 74 пробы «фоновых» базальтов и 44 пробы «рудных» базальтов.

Для отобранных образцов проведены петрографические исследования и статистическая обработка петрографо-геохимических данных. Микроскопические исследования проведены с использованием поляризационного микроскопа Axioscope A1 CZ. В качестве

петрографических переменных для последующего факторного анализа выделены – содержания фенокристаллов (%), вулканического стекла (%), микролитов (%), степень измененности породы (%) и пористость (% от общего объема породы).

При проведении факторного анализа уровень значимости принят 5%, аномальные значения, превышавшие три стандартных отклонения, заменены на предельно допустимые значения. В результате проверки закона распределения, установлено, что переменные выборок отвечают нормальному или логнормальному распределению. Для переменных проведен факторный анализ [3].

Для «фоновых» базальтов выделены три фактора, суммарно объясняющие 60% дисперсии состава и характеристик ($F_1=39\%$, $F_2=13\%$, $F_3=9\%$). Для «рудных» базальтов факторный анализ был проведен отдельно для петрогенных и редких элементов, и выделены по три значимых фактора, которые в совокупности описывают 65% и 62% изменчивости, соответственно. Для петрогенных: $F_1 - 27\%$, $F_2 - 22\%$, $F_3 - 16\%$; для редких – 36%, 15% и 10% соответственно. Статистический анализ выполнен в программе STATISTICA.

Изученные базальты представлены афировыми и порфиоровыми разновидностями с фенокристаллами плагиоклаза и оливина. Породы раскристаллизованы в различной степени – от закалочного стекла до микроофитовых базальтов со всеми промежуточными структурными разновидностями.

Большая часть исследованных образцов относится к афировым и слабопорфиоровым стекловидным и микрокристаллическим базальтам с содержанием вкрапленников до 5%. Для стекловидных и тонкокристаллических разновидностей характерны перистые, метельчатые и вариолитовые структуры основной массы, образованные микролитами пироксена и плагиоклаза. В более раскристаллизованных образцах наблюдаются интерсертальные и, реже, пилотакситовые структуры, сложенные длинными игольчатыми лейстами и скелетными микролитами плагиоклаза андезина (№ 35–45), округлыми зернами оливина и более редкими призматическими кристаллами клинопироксена, между которыми расположено вулканическое стекло с тонкодисперсным рудным материалом. Фенокристаллы в этих образцах представлены свежим оливином размером 0.1–0.3 мм (2–5%) и плагиоклазом андезин-лабрадора (№ 45–55) размером 0.1–0.6 мм (<5%).

Часть базальтов представляют собой умереннопорфиоровые разновидности с содержанием вкрапленников от ~5% до 15%. Структура основной массы в них значительно варьируется: от стекловидных и скрытокристаллических до мелкозернистых, с преобладанием интерсертальных и перистых. Плагиоклаз андезин-лабрадор (№ 40–60) является наиболее распространенной фазой вкрапленников (2–15%), в

большинстве образцов также присутствуют фенокристаллы оливина (<15%). Размер вкрапленников плагиоклаза составляет менее 5 мм (в среднем 0.5–1.5 мм), и они представляют собой вытянутые и короткие призмы от эвгедральной до субгедральной формы и более редкие скелетные кристаллы. Вкрапленники оливина представлены ромбическими и короткопризматическими кристаллами эвгедральной формы размером до 2 мм (в среднем 0.1–0.6 мм), а также скелетными кристаллами. Большая часть оливина свежая, в редких случаях наблюдается развитие тонких кайм иддингсита или серпентина вдоль трещин.

Базальты содержат от 1% до 15% от площади породы округлых пор размером 0.05–1.3 мм (обычно 0.1–0.4 мм). Почти все поры частично или полностью заполнены моно- или полиминеральными вторичными минералами. Часто наблюдается последовательное концентрическое заполнение, главным образом последовательностью нонтронит – селадонит – окси-гидроксидами железа.

Гидротермальные изменения базальтов выражены в хлоритизации и окварцевании пород, замещении вулканического стекла и заполнении пор агрегатами сапонита, нонтронита, селадонита и окси-гидроксидами железа. Большая часть образцов изменена только с поверхности, по трещинам и пустотам, с сохранением свежей породы в центральной части. «Рудные» базальты отличаются более интенсивно проявленными вторичными изменениями – для них более характерны развитие вторичных окси-гидроксидов железа, иддингсита по оливину, сосюритизация фенокристаллов плагиоклаза и появление сульфидов (пирита, халькопирита) и фельдшпатоидов (лейцита, анальцима).

Микроскопически различия между «фоновыми» и «рудными» базальтами достаточно слабые. «Рудные» отличаются небольшим преобладанием порфириковых разностей и большей степенью вторичных изменений, раскристаллизованности основной массы и встречаемости акцессорной хромшпинели.

Геохимические особенности базальтов по петрогенным элементам сходны и близки к N-MORB типу. Породы относятся к низкощелочной разновидности толеитовой серии. Согласно диаграмме $MgO-(FeO^*+TiO_2)-Al_2O_3$ [4] породы представлены высокожелезистыми толеитовыми базальтами, в единичных случаях – известково-щелочными базальтами с параметрами: коэффициентом магнезиальности ($Mg\# = MgO/(MgO+FeO)$) $Mg\# = 0.48-0.72$, $Fe_2O_3 = 6.4-15.3$ мас.%, $CaO = 9.31-14.4$ мас.%, $Al_2O_3 = 12.8-22.9$ мас.%, $Na_2O+K_2O = 1.9-4.0$ мас.%. «Рудные» отличаются более высоким содержанием K_2O (средние 0.3 мас.% и 0.2 мас.% соответственно) и P_2O_5 (0.2 мас.% и 0.1 мас.% соответственно).

Для всех базальтов характерны минимумы Co, Ni и Cr и максимумы Cu, Pb и Ba на нормализованных на MORB мультиэлементных спектрах [5]. «Фоновые» базальты имеют отрицательные аномалии P, La, Ce, Nd и выше

типичных MORB содержания Cu, Zn, Pb, Ba. «Рудные» отличаются обогащением Zr, Nb, La. Базальты характеризуются почти плоскими кривыми распределения РЗЭ: $(La/Yb)_N=0.5-1.9$, при низкой степени дифференциации LREE и HREE: $(La/Sm)_N=0.4-1.4$, $(Gd/Yb)_N=0.9-1.5$. Отмечается отсутствие минимумов Eu ($Eu/Eu^*=0.9-1.1$). По распределению РЗЭ базальты близки к спектру характерному для N-MORB базальтов [6].

Факторный анализ позволил выявить несколько факторов, описывающих распределение химических элементов и петрографических характеристик в породах. Для «фоновых» базальтов выделено три фактора, значимо описывающих изменчивость распределения элементов и отражающих преимущественно первичные магматические процессы. Так Фактор 1 (вклад фактора 39%) предположительно связан с вариациями состава источника базальтового расплава и/или степенью магматической дифференциации. Отрицательный вклад Al, Ca и Ni, а также количества фенокристаллов указывает на противопоставление пород с более выраженной кристаллизацией фенокристаллов плагиоклаза/оливина и более поздних составов с повышенными HFSE и REE, что отвечает классической магматической дифференциации базальтов [5]. Фактор 3 (9%) также подчеркивает данное противопоставление и, вероятно, связан с ранней кристаллизацией фенокристаллов оливина (положительное влияние оказывают Mg, Mn и Cr). Тем не менее, наличие сильного положительного вклада Fe, Mn и переходных металлов (Cu, Zn, Pb) на Фактор 2 (13%), указывает на роль либо поверхностного гидротермального воздействия, либо физико-химических условия, при которых стекло сохраняет/накапливает гидротермальные продукты.

В «рудных» базальтах выделено три фактора, значимо описывающих изменчивость распределения элементов. Выделенные факторы отражают как первичные магматические процессы и деятельность гидротермальных систем. Так, Фактор 1 (вклад 27% на петрогенные элементы) связан со степенью «железистости» пород. Увеличение содержания Fe–Ti–Mn можно интерпретировать как результат фракционирования плагиоклаза и накопления оксидных фаз (ильменита, титаномагнетита), что типично для эволюционирующих MORB-расплавов [6]. Сильное влияние оказывает и кристаллизационная дифференциация – на петрогенные элементы Фактор 2 (22%), на редкие Фактор 1 (36%), что выражается накоплением Si, K и несовместимых элементов (HFSE и LREE) в остаточном расплаве и уменьшением содержания магнезиальных элементов (Mg, Mn, Cr). Степень раскристаллизованности наиболее слабо влияет на распределения – Фактор 3 (16% для петрогенных и 10% для редких). Гидротермальная активность фиксируется Фактором 2 в редких элементах (15%), что отражается в увеличении степени изменения и пористости, выносу совместимых элементов (Ni, Co, Cr, V) и обогащению пород Cu и, более слабо, Ba. Стоит отметить, что Zn имеет отрицательную нагрузку на Фактор 2, что

противопоставляет его с Cu. Отрицательная нагрузка Zn относительно Cu отражает различие в поведении элементов в гидротермальных системах: Cu, как правило, осаждается в сульфидных фазах, тогда как Zn дольше сохраняется в растворе [7].

По петрографическим и геохимическим признакам базальты различаются слабо и близки к типичным N-MORB. Базальты, расположенные в зоне активной деятельности гидротермальной системы, отличаются большей степенью кристаллизационной дифференциации – они обогащены K_2O , P_2O_5 , Zr, Nb и La. Не смотря на большой вклад первичных магматических процессов на характеристики базальтов, именно для «рудных» базальтов выделяется воздействие активной гидротермальной системы в росте содержаний Cu, Ba, пористости и степени изменения породы, при снижении содержаний Ni, Co, Sr в породах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Силантьев С.А., Бортников Н.С., Шатагин К.Н. и др. Условия петрогенезиса в осевой зоне САХ на 18°-20° с.ш.: взаимодействие гидротермальных и магматических систем // Петрология. 2016. Т. 24. № 4. С. 363–395.
2. Силантьев С.А., Буйкин А.И., Цховребова А.Р. и др. Вариации состава закалочных стекол MORB Срединно-Атлантического хребта, 12°–31° с.ш.: отражение эволюции состава родительских расплавов и влияния гидротермального компонента // Петрология. 2023. Т. 31. № 5. С. 463–481.
3. Белонин М.Д., Голубева В.А., Скублов Г.Т. Факторный анализ в геологии. М.: Недра, 1982. 269 с.
4. Jensen L.S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. Ontario Division Mines Misc. 1976. 66 p.
5. Arevalo R., McDonough W.F. Chemical variations and regional diversity observed in MORB // Chemical Geology. 2010. № 271 P. 70–85.
6. Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes // Magmatism in the Ocean Basins / Saunders A.D. and Norry M.J. (Eds.). Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
7. Fouquet Y. 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 // Washington DC American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 2010. V. 188. P. 321–367.

The results of the study on basalts in the MAR (16–21° N) area are presented, divided into background and ore types. Petrographic differences between the basalts are weakly expressed, however, according to geochemical data, ore basalts are enriched in K_2O , P_2O_5 , Zr, Nb and La. Factor analysis identified combinations of features that reflect both magmatic and hydrothermal processes.

Мелекесцева И.Ю.

(Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, г. Миасс, e-mail: melekestseva-irina@yandex.ru)

Гидротермальные сульфидные поля, связанные с внутриокеаническими комплексами: возможная типизация Melekestseva I.Yu.

(South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass)

Hydrothermal sulfide fields related to oceanic core complexes: a possible classification

Ключевые слова: срединно-океанический хребет, гидротермальное сульфидное поле, внутриокеанический комплекс, ультрамафиты, базальты, сульфиды, элементы

Проанализированы минералого-геохимические особенности руд гидротермальных сульфидных полей (ГСП), ассоциирующих с внутриокеаническими комплексами (ВОК). Минералого-геохимические особенности сульфидных руд отражают влияние подстилающих пород и указывают на то, что эти ГСП можно подразделить на три типа, пространственно и генетически связанные 1) с ультрамафитами ВОК, 2) базальтами ВОК и 3) в которых проявлен вклад и мафитов, и ультрамафитов в рудообразование. На некоторых ГСП в рециклинговую систему вовлечены базальты типа E-MORB и кислые породы, а также проявлен магматический вклад.

Медленно- и ультрамедленно-спрединговые срединно-океанические хребты (СОХ) содержат гидротермальные сульфидные поля (ГСП), связанные с внутриокеаническими комплексами (ВОК). Поскольку ВОК выводят на морское дно мантийные породы [1], считается, что ГСП, связанные с ВОК, ассоциируют с ультрамафитами [2]. Однако многочисленные исследования показывают сложное геологическое строение ВОК, которые, в частности, часто прорываются поздними излияниями базальтов [3]. Это приводит к тому, что ГСП, связанные с выходами ВОК, могут отличаться друг от друга как в пределах одного ВОК, так и от ГСП других ВОК. Известно, что вмещающие породы напрямую влияют на минералого-геохимические особенности сульфидных руд ГСП [2]. В связи с этим в настоящей работе представлена возможная типизация ГСП СОХ, связанных с ВОК, на основе минералого-геохимических особенностей сульфидных руд.

К настоящему моменту в медленно- и ультрамедленно-спрединговых СОХ известно более десяти сульфидных рудных узлов, связанных со структурами ВОК: Логачев, Рейнбоу, Ашадзе, Семенов, Ириновское, Победа, Коралловое, Молодежное, Победа и Нибелунген в Атлантическом океане, Чеум (Cheoem), Ари (Ari), Мирае-2 (Mirae-2), Кайреи (Kaiei) и Тиансиу (Tianxiu) в Индийском океане и не слабо изученное поле Лаки Би (Lucky B) в Северном Ледовитом океане.

По минералого-геохимическим особенностям сульфидных руд, которые

отражают влияние подстилающих пород, ГСП ВОК можно подразделить на три типа, пространственно и генетически связанные 1) с ультрамафитами ВОК (например, Логачев, Рейнбоу-1, Ашадзе, Нибелунген, Тиансиу), 2) базальтами ВОК (например, Семенов-1, -2, -3, -4, и, частично, -5) и 3) в которых проявлен вклад и мафитов, и ультрамафитов в рудообразование (например, Семенов-5, Ириновское, Мирае-2, Рейнбоу-2, Кайреи).

Руды ГПС типа 1 характеризуются медно-цинковым составом с повышенным содержанием Au, Ag, Co, Ni и Sn, пониженным содержанием SiO_2 (медиана 3.84% [2]), а также обилием пирротина, что отражает сильно восстановительные условия образования, и практически полным отсутствием барита. Так, например, руды ГСП Логачев, Рейнбоу-1, и Ашадзе содержат 500 г/т Co и 92 г/т Ni, 5086 г/т Co и 490 г/т Ni и 2882 г/т Co и 973 г/т Ni, соответственно [2], хотя содержания Co, например, в рудах ГСП Чеум не превышают 30 г/т [4]. Считается, что повышенное содержание Sn в рудах является одним из индикаторов связи рудообразования с ультрамафитами [5]. Содержания Sn в рудах ГСП Логачев и Чеум достигают 2000 и 1750 г/т, соответственно [2, 6]. В рудах ГСП Рейнбоу, Ашадзе и Тиансиу среднее содержание Sn ниже (108, 359 и 225 г/т соответственно), но оно значительно превышает таковое в рудах ГСП, связанных с базальтами N-MORB (1–25 г/т) [2, 7]. В то же время, в рудах ГСП Ари среднее содержание Sn составляет всего 27 г/т при содержании Co в медных сульфидах 3925 г/т [8].

Руды ГСП типа 2 (Семенов-1, -2, -3, -4 и, частично, -5) характеризуются присутствием разных минералогических типов, отличаются высокими содержаниями SiO_2 (медиана 26.59%) и крайне низкими содержаниями Co и Ni, которые не превышают 150 и 83 г/т, соответственно [9]. Руды полей Семенов-1, -3, -4 и, частично, -5, имеют марказит-пиритовый состав, а также характеризуются высоким содержанием барита (до 20 об. %) и опала [9, 10]. Повышенные содержания Ba (10–20%) характерны для руд ГСП Лаки Страйк и Менез Гвен, связанных с Азорской горячей точкой и базальтами типа E-MORB [11]. Медно-цинковая специализация (Cu до 19.33%, Zn до 18.32%) руд ГСП Семенов-2 с высокими содержаниями благородных металлов (Au до 188 г/т, Ag до 1788 г/т) и повышенными содержаниями Sn (125 г/т) сближает их с рудами ГСП первого типа, однако эти руды имеют крайне низкие содержания Co и Ni (147 и 8 г/т соответственно), но повышенные содержания SiO_2 (до 29.62%) и Te (34 г/т) [12].

Некоторые ГСП характеризуются минералого-геохимическими чертами сульфидных руд, которые могут отражать вклад как ультрамафитов, так и базальтов в рудообразование (тип 3). Так, например, руды практически не изученного поля Рейнбоу-2 характеризуются высокими содержаниями Pb (2%) и Ba (16.20%) [2], что характерно для ГСП, ассоциирующих с базальтами E-MORB [11]. Медные руды ГСП Мирае-2, в среднем, обогащены Co (1109 г/т) и Sn (203 г/т), тогда как цинковые разновидности

имеют высокие содержания Pb (до 8%) и Ba (>1%) [6]. В рудах ГСП Семенов-5 средние содержания Co составляют 769 г/т при относительно повышенном среднем содержании Ba (4848 г/т) и низком среднем содержании Sn (11 г/т), Pb (125 г/т) и Si (5.5%) [10]. В рудах ГСП Победа-1 и -2 также наблюдаются низкие содержания Sn (среднее 9 и 5 г/т) при ощутимых содержаниях Co (среднее 399 и 775 г/т) и Ni (237 и 103 г/т) [13]. Некоторый вклад ультрамафитов не исключен в рудообразование на поле Ириновское: содержание Co и Ni составляет 588 и 451 г/т в медноколчеданных и 450 и 330 г/т серноколчеданных рудах при максимальном содержании Sn 45 г/т [14], хотя Cd/Zn отношение в цинковых рудах этого ГСП соответствует таковому, типичному для базальтовых систем [15]. По высокому суммарному содержанию Cu и Zn (до 29.3%) и повышенному среднему содержанию Au (5.28 г/т) сульфидные руды ГСП Кайреи связываются с влиянием ультрамафитов, однако среднее содержание Co составляет всего 305 г/т, а среднее содержание Sn – 30 г/т [16], при этом Sn обогащены Zn-содержащие сульфиды в отличие от ГСП Логачев или Чеум, где медный тип сульфидов обогащены Sn [2, 6].

Таким образом, на основании минералого-геохимических особенностей сульфидных руд можно предположить, что гидротермальные сульфидные поля, расположенные на внутриокеанических комплексах, могут быть генетически связаны как с мантийными породами, так и с базальтами. Кроме того, в рециклинговую систему могут быть вовлечены базальты типа E-MORB и кислые породы. Некоторые минералого-геохимические особенности руд отражают магматический вклад в рудообразование. Определение вклада каждого компонента в рудообразование требует дальнейшего всестороннего изучения геологии, минералогии и геохимии этих гидротермальных полей.

Автор признателен сотрудникам АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» за возможность участия в рейсах № 30 и 34 НИС «Профессор Логачев» и отбора образцов для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. № 9. P. 790–795.
2. 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 deposits // *Diversity of hydrothermal systems on slow spreading ocean ridges / Rona P.A., Devy C.W., Dymant J., Murton B.J. (Eds.) AGU Geophys. Monograph*. 2010. P. 321–368.
3. Перцев А.Н., Бортников Н.С., Власов Е.А. и др. Современные

колчеданные залежи рудного района Семенов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с.ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 5. С. 400–415.

4. Choi S.K., Pak S.J., Kim J. et al. Gold and tin mineralisation in the ultramafic-hosted Cheoem vent field, Central Indian Ridge // *Mineralium Deposita*. 2021. V. 56. P. 885–906.

5. Evrard C., Fouquet Y., Moëlo Y. et al. Tin concentration in hydrothermal sulphides related to ultramafic rocks along the Mid-Atlantic Ridge: a mineralogical study // *European Journal of Mineralogy*. 2015. V. 27. P. 627–638.

6. Choi S.K., Kim J., Pak S.J. et al. Multi-source hydrothermal mineralisation in the ultramafic-hosted Mirae-2 vent field, Central Indian Ridge // *Mineralium Deposita*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s00126-025-01347-x>

7. Yang M., Wang Y., Petersen S. et al. Gold mineralization in the hydrothermal field at the termination of a detachment fault: A case study of the Tianxiu vent field // *Mineralium Deposita*. 2024. V. 60. P. 911–935.

8. Choi S.K., Pak S.J., Kim J. et al. Mineralogy and trace element geochemistry of hydrothermal sulfides from the Ari vent field, Central Indian Ridge // *Mineralium Deposita*. 2023. V. 58. P. 1537–1558.

9. Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Иванов В.Н. и др. Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет // *Литосфера*. 2010. № 2. С. 47–61.

10. Firstova A., Cherkashov G., Stepanova T. et al. New data for the internal structure of ultramafic-hosted seafloor massive sulfides (SMS) deposits: case study of the Semenov-5 hydrothermal field (13°31' N, MAR) // *Minerals*. 2022. V. 12. #1593.

11. Fouquet Y., Charlou J.-L., Costa I. et al. A detailed study of the Lucky Strike hydrothermal site and discovery of a new hydrothermal site: Menez Gwen; preliminary results of the DIVA1 Cruise (5-29 May, 1994) // *InterRidge News*. 1994. V. 3(2). P. 14–17.

12. Melekestseva I.Yu., Maslennikov V.V., Tret'yakov G.A. et al. Gold- and silver-rich massive sulfides from the Semenov-2 hydrothermal field, 13°31.13' N, Mid-Atlantic Ridge: A case of magmatic contribution? // *Economic Geology*. 2017. V. 112. № 4. P. 741–773.

13. Габлина И.Ф., Добрецова И.Г., Лайба А.А. и др. Особенности сульфидных руд гидротермального узла Победа (17°07'–17°08' с.ш. Срединно-Атлантического хребта) // *Литология и полезные ископаемые*. 2018. Т. 6. С. 475–500.

14. Яковенко Е.С., Черкашев Г.А., Фирстова А.В. и др. Особенности химического состава сульфидных руд гидротермального поля Ириновское (Срединно-Атлантический хребет) // *Металлогения древних и современных океанов-2023. Минералогия и геохимия рудных месторождений: от теории к практике*. Миасс, ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 2023. С. 13–17.

15. Melekestseva I., Kotlyarov V., Tret'yakov G. et al. The heavy-metal fingerprint of the Irinovskoe hydrothermal sulfide field, 13°20' N, Mid-Atlantic Ridge // *Minerals*. 2022. V. 12. #1626.
16. Wang Y., Han X., Petersen S. et al. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal precipitates from Kairei hydrothermal field, Central Indian Ridge // *Marine Geology*. 2014. V. 354. P. 69–80.

The mineralogical-geochemical peculiarities of massive sulfides from hydrothermal sulfide fields (HSFs) associated with oceanic core complexes (OCC) are analyzed. The mineralogical-geochemical peculiarities of massive sulfides reflect the influence of host rocks and indicate that the OCC-related HSFs can be subdivided on three types: spatially and genetically related to 1) OCC ultramafic rocks, 2) OCC basalts, and 3) those affected both by ultramafic and mafic rocks. Some HSFs exhibit the involvement of E-MORBs and probably felsic rocks, as well as magmatic contribution to sulfide formation.

Перетьяжко И.С., Савина Е.А.

(Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: pgmigor@igc.irk.ru)

Геохимия гидrogenных кобальтобогатых Fe-Mn корок Магеллановых гор, Тихий океан

Peretyazhko I.S., Savina E.A.

(Vinogradov Institute of Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Irkutsk)

Geochemistry of hydrogenic Cobalt-rich Fe-Mn crusts of the Magellan Seamounts, Pacific Ocean

Ключевые слова: геохимия, кобальтобогатые Fe-Mn корки, гайоты Магеллановых гор, Тихий океан

По геохимическим характеристикам слои кобальтобогатых Fe-Mn корок молодой генерации (II и III) являются типично гидrogenным и образовались при отложении Fe-Mn оксигидроксидов из морской воды. Древние слои I-1 и I-2 имели изначально гидrogenное происхождение, но их химический и минерально-фазовый составы были изменены при последующей (наложенной) фосфатизации осадков.

Особенности условий залегания, распространенности и строения, зональность, минеральный и химический составы корок на многих гайотах Магеллановых гор изучались в многочисленных экспедициях научно-исследовательских судов России, Китая, Южной Кореи, Японии и других стран [1, 2]. Основной объем массивов гайотов сложен меловыми щелочно-базальтоидными и вулканокластическими породами. Плато гайотов были на небольшой глубине до конца эоцена, а их погружение до близкого к современному батиметрическому уровню произошло в олигоцене-миоцене [2, 3]. На плато и склонах гайотов Говорова, Альба, Коцебу и других встречаются многочисленные вулканические конуса и купольные постройки, которые формировались на разных этапах процессов вулканотектонической активизации Тихоокеанской плиты, проходивших, вероятно, в кайнозой [3–5]. Так, на гайоте Альба были обнаружены базаниты и туфы “petit-spot” вулканов, извергавшихся в миоцене [6–8]. Fe-Mn корки отлагаются на поверхностях вулканогенных и осадочных пород по периферии плато и склонов гайотов до глубины 3000–3500 м. Пологие склоны гайотов на глубинах более 3500 м перекрываются осадками, и отложение корок на них не происходит. Мощность корок варьирует от 14–15 см на северо-западных гайотах до 20–25 см на юго-восточных, а наиболее мощные корки (до 40 см) встречаются на гайоте Ита Май Таи.

В экспедициях АО “Южморгеология” корки поднимались драгами и в кернах скважин поверхностного бурения. Наиболее представительные пробы (> 10 кг) отбирались после отделения корки от вулканогенных,

вулканокластических или осадочных пород субстрата. Образцы слоев вырезались алмазной пилой из мощных корок, выдерживались в муфельных шкафах не менее 24 часов при 105°C, затем дробились, квартовались и истирались. Образцы корок для наших исследований были отобраны драгами на гайотах Говорова и Коцебу в рейсах НИС “Геленджик” 2016–2017 гг. Из этих корок выделялись фрагменты слоев весом 100–300 г. Пробы анализировались в ЦКП ИГХ СО РАН методами XRF и ICP-MS.

По данным XRF слои Fe-Mn корок содержат 12–15 мас.% LOI за счет адсорбции атмосферной влаги рудной массой. Составы слоев имеют значительные интервалы содержаний оксидов (мас.%): Fe₂O₃ tot. (12–29), MnO tot. (22–35), CaO (3.4–20), P₂O₅ (1–9.4), небольшие примеси TiO₂ (1–2), MgO (1.3–2), Na₂O (1.6–2.5) и K₂O (0.3–1.2). Во всех корках наибольшие концентрации Ca и P характерны для фосфатизированных слоев I-1 и I-2. В большинстве разрезов от слоя I-1 к слою III возрастает количество Fe относительно Mn, а Mn/Fe отношение снижается от 3–2.5 до 1.5–0.8. Во всех корках слои II и III обогащены SiO₂ и Al₂O₃ за счет присутствия в их составе примеси кварца, полевых шпатов и других силикатных минералов.

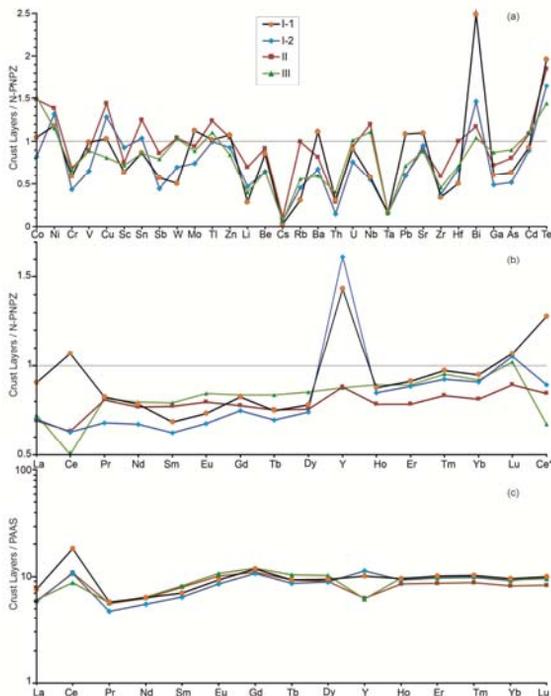


Рис. 1. Средние содержания в слоях корок I-1, I-2, II, III примесных элементов, нормированные к N-PNPZ (a, b) и к PAAS (c).

По спайдер-диаграммам (рис. 1a,b) нормированных значений к среднему составу Fe-Mn корок Non-Prime North Pacific Zone, по [10] слои I-1 и I-2 обогащены Ba, Sr, Pb, Mo, Bi, Te и обеднены Co, Cr, Sb, W, Li, Cs, Zr, Hf, Ga, As и Cd. Для слоя II характерны максимальные концентрации Ni, Cu, Sn, Sb, W, Tl, Li, Cs, Rb, Nb, Zr и Hf. Слой III содержит больше других As, Ni, Ga и меньше Cu, Zn, and Te. Больше всего Y в слоях I-1 и I-2, а содержание Ce максимально в слое I-1 и минимально в слое III. Слой I-2 обеднен Pr, Nd, Sm и Eu, а для слоя II характерна низкая сумма TREE (Ho, Er, Tm, Yb и Lu). Нормированные к PAAS спектры REE+Y слоев имеют типичную для гидrogenных корок форму с положительной аномалией Ce, значение которой (Ce*) снижается от слоя I-1 к слою III (рис. 1c).

Сложные и неоднозначные геохимические характеристики слоев корок были упорядочены методом главных компонент факторного анализа для выборки из 108 анализов на 34 элемента (Co, Ni, Cu, Sb, W, Mo, Zn, Be, Rb, Ba, Sr, Th, U, Nb, Pb, Zr, Hf, Ga, As, REE и Y), а также значений Ce*, сумм LREE, HREE, REE+Y и отношения L/HREE (рис. 2). Первый и наиболее сильный фактор (34.7% от общей дисперсии) объединяет все REE кроме Ce и La. Остальные факторы группируют элементы с факторными нагрузками > 0.5–0.6 следующим образом: второй фактор +(Ce, La, Ba, Mo, Sr, Pb), 16.6%; третий фактор +(Zr, Hf, Nb, Rb, As)/-Pb, 13.9%; четвертый фактор +(U, Th, Co, As, Sb, W)/-Y, 7.5%. По значениям первого фактора слои не различаются, поскольку их составы имеют близких диапазон содержаний всех REE (Pr, Nd, Sm, Eu, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, and Lu) кроме Ce and La. По значениям второго фактора преимущественно выделяется поле составов слоя I-1 с хорошо проявленными корреляционными связями между Ce, Ce*, La, LREE, L/HREE, Ba, Mo, Sr и Pb. Третий фактор показывает, что некоторым составам слоев II и III свойственны повышенные концентрации Zr, Hf, Nb, Rb, As и высокие коэффициенты корреляции между этими элементами. Наименьшие значения четвертого фактора характерны составам слоя I-2, имеющим сильные отрицательные связи между Y и группой элементов U, Th, Co, As, Sb, W. Таким образом, по значениям факторов достаточно обособленно выделяются поля составов, особенно контрастно для слоев I-1, I-2 и II+III по факторам 2 и 4 (рис. 2).

По геохимическим характеристикам слои корок молодой генерации (II и III) являются типично гидrogenным и образовались при отложении Fe-Mn оксигидроксидов из морской воды. Слои I-1 и I-2 имели, вероятно, изначально гидrogenное происхождение, но их химический и минерально-фазовый составы были изменены во время двух эпизодов глобальной фосфатизации осадков Тихого океана в позднем эоцене – раннем олигоцене от 39 до 43 млн. лет и в позднем олигоцене – раннем миоцене от 27 до 21 млн. лет [9]. В слоях корок Магеллановых гор установлены значительные вариации концентраций примесных элементов как в пределах одного гайота, так и между гайотами. Большая неоднородность распределений

примесных элементов в слоях одного возраста, возможно, связана с гидродинамикой подводных течений, определяемой, рельефом поверхности гайотов и положением Магеллановых гор относительно глобальных палеоклиматических зон в Тихом океане.

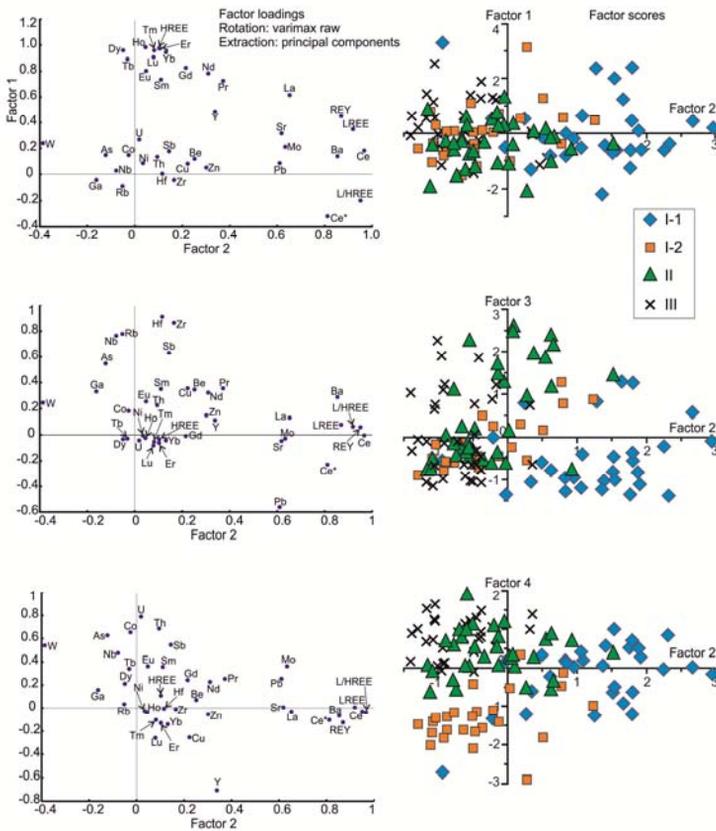


Рис. 2. Результаты факторного анализа методом главных компонент (варимакс исходных значений) для послойных составов корок.

Многочисленные активизации вулканической деятельности в кайнозое на Тихоокеанской плите в районе Магеллановых гор также очевидно оказывали влияние на геохимию корок. Возможно, повышение содержаний Nb, Zr, As, Sb и W в молодых слоях II и III корок было вызвано масштабными проявлениями вулканизма, например, извержениями “petit-spot” вулканов на гайотах в миоцене [6–8].

Авторы благодарят сотрудников АО “Южморгеология”, принимавших участие в отборе пород и Fe-Mn корок, а также аналитиков ИГХ СО РАН, г. Иркутск, помогавших в проведении исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 25-17-00128, <https://rscf.ru/project/25-17-00128/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайоты западной Пацифики и их рудоносность. М.: Наука, 1995. 368 с.
2. Мельников М.Е. Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ФГУП ГНЦ “Южморгеология”, 2005. 230 с.
3. Геология гайотов Магеллановых Гор (Тихий океан) / С.П. Плетнев, М.Е. Мельников, В.Т. Съедин и др. Владивосток: Дальнаука, 2020. 200 с.
4. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Mineral chemistry and formation conditions of minerals in metasomatized oceanic lithosphere and basaltic rocks of Govorov Guyot, Magellan Seamounts, Pacific Ocean // Minerals. 2022. V. 12(10). 1305.
5. Peretyazhko I.S., Savina E.A. Cretaceous intraplate volcanism of Govorov Guyot and formation models of the Magellan seamounts, Pacific Ocean // International Geology Review. 2022. V. 65(16). P. 2479–2505.
6. Мельников М.Е., Подшувейт В.Б., Пуляева И.А., Невретдинов Эр.Б. Средне-миоценовые вулканические постройки на гайоте Дальморгеология (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19(5). С. 38–46.
7. Перегяжко И.С., Савина Е.А., Пуляева И.А., Юдин Д.С. Внутриплитный вулканизм гайота Альба: геодинамические модели формирования Магеллановых гор в Тихом океане на протяжении 100 млн. лет // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 1. С. 3–33.
8. Peretyazhko I.S., Savina E.A., Pulyaeva I.A. Miocene petit-spot basanitic volcanoes on Cretaceous Alba Guyot (Magellan Seamount Trail, Pacific Ocean) // Geosciences. 2024. V. 14. 2522.
9. Hein J.R., Yeh H.-W., Gunn S.H. et al. Two major Cenozoic episodes of phosphogenesis recorded in equatorial Pacific seamount deposits // Paleooceanography. 1993. V. 8. P. 293–311.
10. Hein J.R., Mizell K., Koschinsky A., Conrad T.A. Deep-ocean mineral deposits as a source of critical metals for high- and green-technology applications: Comparison with land-based resources // Ore Geol. Rev. 2013. V. 51. P. 1–14.

Based on their geochemical characteristics, the layers of Cobalt-rich Fe-Mn crusts of the young generation (II and III) are typically hydrogenic and formed by the deposition of Fe-Mn oxyhydroxides from seawater. Ancient layers I-1 and I-2 were initially hydrogenic in origin, but their chemical and mineral phase compositions were altered by subsequent (superimposed) phosphatization of the Pacific sediments.

**Петров В.А.¹, Судариков С.М.², Токарев И.В.³,
Наркевский Е.В.⁴, Мальцева К.П.¹**

(¹ФГБУ «ВНИИОкеангеология», г. Санкт-Петербург, e-mail: v.a.petrov@vniio.ru;
²Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург; ³Санкт-Петербургский государственный университет РЦ РДМИ
Научный парк СПбГУ, г. Санкт-Петербург; ⁴ФГБУ «Институт Карпинского», г. Санкт-Петербург)

**Изотопный состав кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$) в
придонных водах Российского разведочного района
Срединно-Атлантического хребта (17°08.6' с.ш.)**

**Petrov V.A.¹, Sudarikov S.M.², Tokarev I.V.³, Narkevsky E.V.⁴,
Maltceva K.P.¹**

(¹FSBI «VNIIOkeangeologiya», St. Petersburg; ²Empress Catherine II Saint Petersburg
Mining University, St. Petersburg; ³Saint Petersburg State University, RC RDMI, SPbU
Research Park, St. Petersburg; ⁴FSBI «Karpinsky Institute», St. Petersburg)

**Isotopic composition of oxygen and hydrogen ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) in
the bottom waters of the Russian Exploration Area of the Mid-
Atlantic Ridge (17°08.6' N)**

Ключевые слова: Срединно-Атлантический хребет, гидротермальные растворы, стабильные изотопы кислорода и водорода

В работе исследовано распределение стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) в придонных водах российского участка Срединно-Атлантического хребта (около 17°08' с.ш.) на основании результатов 37-го рейса НИС «Профессор Логачев». Выявлены аномалии мутности и пониженной солёности, свидетельствующие о гидротермальной активности. Измеренные значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -2.8 до -2.0‰, $\delta^2\text{H}$ – от -13 до -2‰, что указывает на облегченный изотопный состав вод на участках разгрузки гидротермальных растворов относительно SMOW. Облегчение состава может быть объяснено процессами фазовой сепарации и кипения гидротермального раствора в подповерхностных глубоководных условиях. Результаты подтверждают эффективность стабильных изотопов кислорода и водорода как индикаторов современной гидротермальной активности на дне океана.

Глубоководные гидротермальные системы, приуроченные к срединно-океаническим хребтам, играют ключевую роль в формировании рудных месторождений и биогеохимических циклах океана. В 2012 г. между Россией и Международным органом по морскому дну ООН заключен контракт на исследование участка Срединно-Атлантического хребта (СAX), в рамках которого открыты новые гидротермальные поля. Поиск современных зон разгрузки гидротермальных растворов осложнен большими глубинами (до 6000 м) и требует применения

высококочувствительных методов. Основным поисковым признаком таких зон является гидротермальный «ореол рассеяния» (плюм). Данная работа посвящена исследованию закономерностей распределения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в придонных водах изученного участка САХ и их взаимосвязи с гидрофизическими параметрами. Было показано, что стабильные изотопы водорода ($\delta^2\text{H}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) служат эффективными индикаторами гидротермальной активности.

Изучение выполнялось в ходе 37-го рейса НИС «Профессор Логачев» (АО «ПМГРЭ») в районе $17^\circ 08.6'$ с.ш. Применялись следующие основные методы:

- *CTD-зондирование.* С помощью зонда SBE 911plus проводилось измерение температуры, солёности, давления и мутности водной толщи.

- *Отбор и анализ проб вод.* На 31 станции зондирования отбирались пробы придонных вод. На суше под руководством И.В. Токарева проводился анализ $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ методом лазерной спектроскопии (Picarro L2120-i). Для калибровки использовали международные стандарты VSMOW-2, GISP, USGS45 (точность измерений $\pm 0.1\%$ для $\delta^{18}\text{O}$ и $\pm 1\%$ для $\delta^2\text{H}$).

На исследуемом участке зафиксированы резкие аномалии мутности и пониженной солёности, что вкупе с визуальными наблюдениями «черных курильщиков», указывает на разгрузку гидротермального раствора в водную толщу. Аномалии мутности местами достигают 0.045 FTU (станция 37L198z).

В интервалах гидрофизических аномалий измеренные значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в диапазоне $-2.8 \dots -2.0\%$, $\delta^2\text{H} - -13 \dots -2\%$. Средний изотопный состав придонной воды в пределах аномальных горизонтов составил примерно $\delta^{18}\text{O} \approx -2.4\%$ и $\delta^2\text{H} \approx -6.6\%$, тогда как вне аномалий средние значения были ниже ($\delta^{18}\text{O} \approx -3.3\%$, $\delta^2\text{H} \approx -8.3\%$). Таким образом, в пределах гидротермальных плюмов наблюдается заметное облегчение изотопного состава придонных вод. Полученные величины легче стандартной океанической воды SMOW, что является характерным признаком гидротермальных растворов.

Данные по изотопному составу водорода и кислорода гидротермальных растворов и плюмов Атлантики достаточно скудны по сравнению с другими регионами Мирового океана [1]. В случае участия метеорных вод в гидротермальных процессах, растворы имеют гораздо более облегченный состав по O и H относительно SMOW. Для гидротермальных систем хребта Рейкьянес (северная часть САХ, вблизи берегов Исландии), растворы характеризуются значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ около 2 и -24% соответственно, при доле метеорных вод – 30% [2].

В отсутствие метеороного компонента наблюдаемое облегчение состава может быть объяснено другими факторами. Компьютерное моделирование [3, 4] показало, что изотопные отклонения $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в гидротермальных

растворах могут быть объяснены: взаимодействием с вмещающими водами, включением ювенильной составляющей, а также фазовой дифференциация растворов при высоких температурах. При этом было отмечено, что количество ювенильной воды не может превышать 5% [3, 4].

Облегчение придонных вод (относительно SMOW) на САХ может быть объяснено процессами подповерхностной фазовой сепарации парогазового флюида. При кипении гидротермального раствора тяжелые изотопы ^{18}O и ^2H концентрируются в более минерализованных (плотных) частях раствора, которые не обладают положительной плавучестью. Это приводит к образованию так называемых «реверс-плюмов», характерных для атлантических гидротермальных систем. Подводные гидротермальные «взрывы» и кратеры, отмеченные на некоторых полях САХ, также свидетельствуют о вероятном кипении и периодической интенсификации разгрузки. Помимо кипения, определенное влияние оказывает смешение с холодными антарктическими водами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zeng Z. et al. Strontium, Hydrogen and Oxygen Behavior in Vent Fluids and Plumes from the Kueishantao Hydrothermal Field Offshore Northeast Taiwan: Constrained by Fluid Processes // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. V. 10. № 7. P. 845.
2. Pope E.C. et al. Iceland Deep Drilling Project (IDDP): stable isotope evidence of fluid evolution in Icelandic geothermal systems // *World Geothermal Congress, Bali, Indonesia*. 2010. P. 1–7.
3. Гричук Д.В. Термодинамические модели субмаринных гидротермальных систем. М.: Наука, 2000. 304 с.
4. Bowers T.S., Taylor Jr H.P. An integrated chemical and stable-isotope model of the origin of midocean ridge hot spring systems // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1985. V. 90. № B14. P. 12583–12606.

Turbidity and low-salinity anomalies were identified in the near-bottom waters of the MAR (17°08' N), indicating hydrothermal activity. The measured $\delta^{18}\text{O}$ values range from -2.8 to -2.0‰ , and $\delta^2\text{H}$ from -13 to -2‰ . This isotopically light water composition can be explained by phase separation and boiling of hydrothermal fluids under subsurface. This confirm the effectiveness of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ from as indicators of hydrothermal activity.

Федоров Н.Н.¹, Ключиткин А.А.², Кравчишина М.Д.²

(¹Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, e-mail:

nikolay20021604@gmail.com, ²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва)

Построение прогнозных ореолов выпадения минеральных частиц гидротермального происхождения на океаническое дно по данным автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий

Fedorov N.N.¹, Klyuvitkin A.A.², Kravchishina M.D.²

(¹University of Science and Technology MISIS, Moscow, ²Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow)

Construction of predictive halos for the fallout of hydrothermal mineral particles onto the ocean floor based on data from automatic deep-water sedimentary observatories

Ключевые слова: осадочное вещество, гидротермальные источники, рельеф дна, физическое моделирование, компьютерное моделирование, заякоренные платформы

Изучены процессы латерального переноса осадочного минерального вещества гидротермального происхождения на южной оконечности хребта Мона в районе Ян-Майенской горячей точки (Норвежско-Гренландский бассейн) на основе данных автономной глубоководной седиментационной станции АГОС-1 (4–8 июня 2019 г.), улавливающей вещество плюма нейтральной плавучести. Результаты моделирования подтвердили, что преобладающая часть гидротермальных частиц, таких как барит и пирит, осаждается на дно в пределах 100 м и 650 м, соответственно, от точки установки АГОС, формируя ореол рассеяния вдоль траектории преобладающего направления придонных течений.

В работе исследовалось осаждение частиц гидротермального генезиса на южной оконечности хребта Мона (рис. 1) – заполярном участке Срединно-Атлантического хребта [2, 3] в районе проявления Ян-Майенской горячей точки [1]. Краткосрочная постановка АГОС с седиментационными ловушками проводилась в 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» 4–8 июня 2019 г. на гидротермальных полях Троллвегген и Сория Мория. Использованы малые цилиндрические ловушки МСЛ-110.

Модель разработана на основе данных, полученных с помощью АГОС-1, заякоренной на дне (71° 17.883' с.ш. и 005° 46.359' в.д.) вблизи гидротермального поля Троллвегген 4 июня 2019 г. в 10:14 по Всемирному времени [4]. Глубина в месте установки составила 550 м. Для регистрации параметров среды на придонном горизонте АГОС-1 были установлены акустический измеритель течения Nortek Aquadopp и STD-профилограф SBE37. Минералы гидротермального генезиса (барит, пирит, сфалерит, гипс и др.) были обнаружены только в ловушках, закрепленных на глубине 520 м

в придонном горизонте в 30-и метрах от дна. В слоях воды выше этого уровня не установлены минералы гидротермального генезиса микронного или субмикронного размеров, идентифицируемые под электронным сканирующим микроскопом.

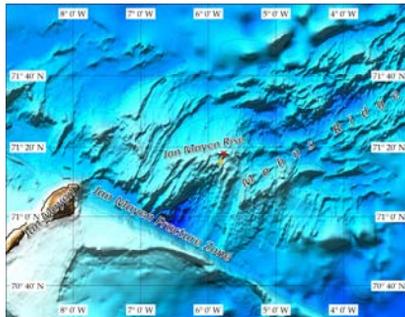


Рис. 1. Схема расположения АГОС (красный и желтый треугольники) на осевом вулканическом поднятии хребта Мона. Батиметрическая основа GEBCO.

Разработана специальная оригинальная программа для анализа данных о скоростях и направлениях течений на глубине 520 м, накопленных за три дня работы АГОС в области влияния гидротермального плюма нейтральной плавучести. Программа использовалась для генерации и отображения диаграмм направления преобладающих течений за весь период наблюдений (рис. 2).

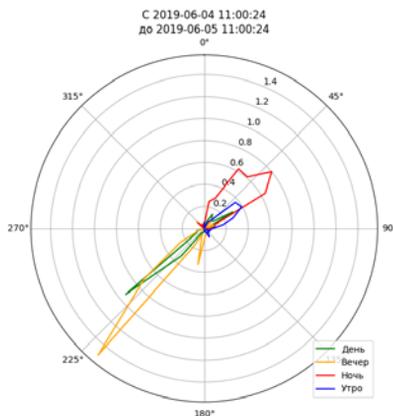


Рис. 2. Диаграмма направления преобладающих течений за суточный период 4–5 июня 2019 г. с разрешением 10°.

Видно (см. рис. 2), что преобладающие течения направлены преимущественно вдоль линии СВ-ЮЗ (азимут 45°/225°), что во многом

обуславливается рельефом дна. В этом же направлении растекается гидротермальный плюм и мигрирует вместе с придонным течением. Периодическая смена направления придонного потока на 180° индуцируется полусуточными приливными течениями с небольшим смещением фаз прилива и отлива.

Далее проанализированы CTD-данные о колебаниях температуры и плотности воды на АГОС-1 за пятидневный период (рис. 3). Положительные температурные аномалии (рис. 4) приурочены к появлению гидротермального плюма в точке и в слое установки придонных ловушек.

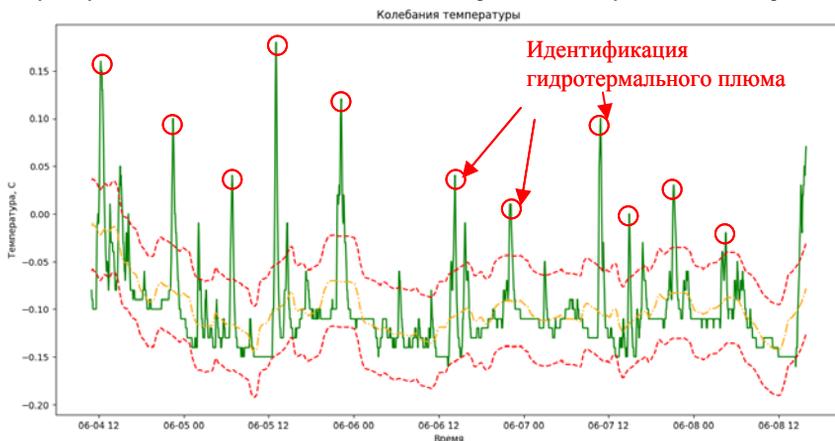


Рис. 3. Колебания температуры с 04 по 08.06.2019 г.

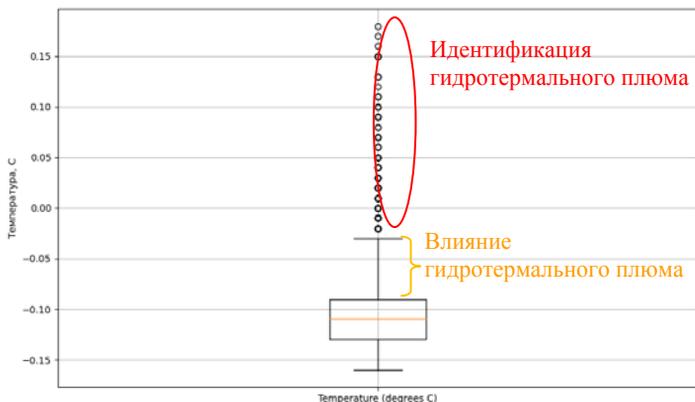


Рис. 4. Температурные аномалии.

На основе данных изучения минерального состава седиментационных ловушек [1] был составлен перечень преобладающих и надежно идентифицированных гидротермальных частиц и их свойства (таблица).

На основе представленных материалов с учетом данных по батиметрии района исследований (данные судового эхолота и базы GEBCO), применяя известные физические модели осаждения минеральных частиц в морской воде, при помощи разработанного программно-аналитического комплекса произведено моделирование осаждения гидротермальных частиц из плюма и построение оценочных ореолов рассеяния этих частиц на дно. По результатам моделирования был составлен ГИС-проект: примеры ореолов выпадения в осадок пирита (рис. 5) и гипса (рис. 6).

Таблица. Описание минеральных частиц гидротермального генезиса

Минерал	Код	Средний размер частиц d , мкм	Фактор формы ϕ	Плотность, кг/м^3
Гипс	G	140	0.75	2300
Барит	Ba	120	0.8	4480
Пирит	Pu	5	1	5025
Сфалерит	Spl	6	1	4025

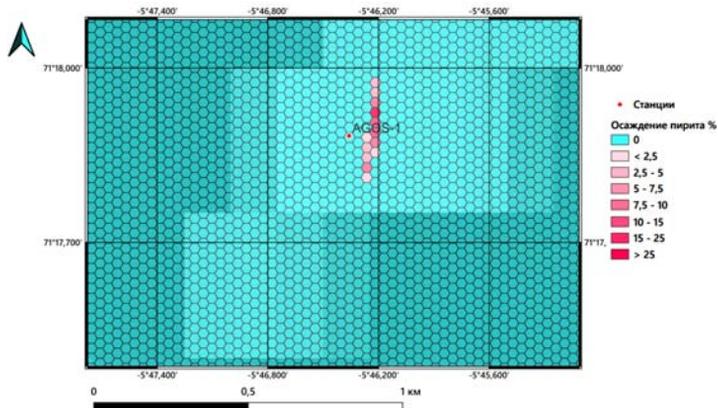


Рис. 5. Ореол осаждения пирита.

Проведенное моделирование позволяет сделать следующие выводы:

1. Сульфаты и сульфиды из гидротермального плюма выпадают оценочно в пределах 100 м и 650 м для барита и пирита, соответственно, от точки постановки АГОС, которая находилась в пределах поля Троллвеген. При этом максимальное число частиц оседает из плюма на дно уже на расстоянии 100 м для барита и гипса и 350 м для сфалерита и пирита. Точка максимума осаждения частиц на океаническое дно находится на прямой преобладающего направления течений СВ-ЮЗ с азимутом 45° .

2. Разработанный метод моделирования переноса частиц взвеси от источника, а также примененные программные средства могут быть востребованы при прогнозном моделировании распространения и осаждения на дне частиц от точечных или условно точечных источников.

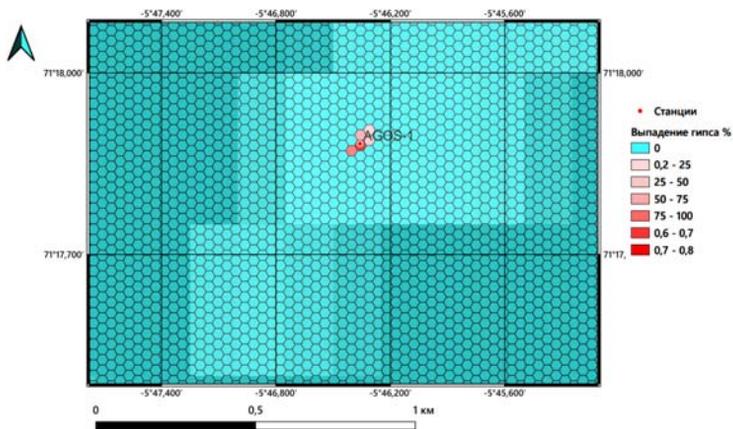


Рис. 6. Ореол осадения гипса.

Экспедиционные работы выполнены с использованием оборудования УНУ «НИС «Академик Мстислав Келдыш»» в составе ЦКП «Научный флот ИО РАН» в рамках госзадания Минобрнауки России для ИО РАН, тема № FMWE-2024-0020. Авторы признательны А.Н. Новигатскому за помощь в проведении исследований.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (№ 25-17-00334, <https://rscf.ru/project/25-17-00334>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Боев А.Г. Потoki осадочного вещества на гидротермальных полях южной части хребта Мона // ДАН. 2021. Т. 497. №1. С.16–22.
2. Pedersen R.B., Thorseth I.H., Nygård T.E. et al. Hydrothermal activity at the Arctic Mid-Ocean Ridges // Geophys. Monogr. Ser. 2010. V. 188. P. 67–89.
3. Kandilarov A., Mjelde R., Pedersen R.B. et al. The northern boundary of the Jan Mayen Microcontinent, North Atlantic determined from ocean bottom seismic, multichannel seismic, and gravity data // Mar. Geophys. Res. 2012. V. 33. P. 55–76.
4. Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Starodymova D.P. et al. Sinking particle fluxes at the Jan Mayen Hydrothermal Vent Field Area from short-term sediment traps // J. of Mar. Sci. and Eng. 2024. V. 12. № 12. DOI 10.3390/jmse12122339.

The distribution of precipitated hydrothermal mineral matter on the ocean floor near the Jan Mayen hotspot (Mona Ridge, northwest Atlantic Ocean) was studied using data from the AGOS-1 autonomous deep-sea station installed there (June 4–8, 2019). Modeling results showed that almost all mineral particles from the hydrothermal vent precipitate within 100 (barite) to 650 (pyrite) meters from the deep-sea station, forming a dispersion halo along the prevailing current direction.

Научное издание
Сборник

ISBN 978-5-6051054-7-3

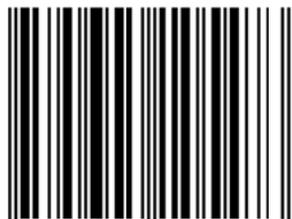
DOI: <https://doi.ocean.ru/10.29006/978-5-6051054-7-3>

Геология морей и океанов
Материалы XXVI Международной научной конференции
(Школы) по морской геологии.

Том I.

Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,
2025. – 304 с.

ISBN 978-5-6051054-7-3



9 785605 105473 >

ISBN 978-5-6051054-7-3