

doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-166-175



ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ХРЕБТА ГАККЕЛЯ С ШЕЛЬФОМ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ЭКСПЕДИЦИИ АРКТИКА-2024

✉ Каминский Д.В.¹, Крылов А.А.¹, Татаринов В.Ю.², Пилицын А.Г.², Рогова И.В.¹,
Аксёнов А.О.³, Семенов П.Б.¹, Киль А.О.¹, Лодочникова А.С.¹,
Шатрова Е.В.¹, Логвина Е.А.¹

¹ ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБУ «ИМГРЭ», Москва, Россия

³ ФГБУ «Институт Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

✉ d.kaminskiy@vniio.ru

В работе представлены предварительные результаты исследований области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых, выполненные в 2024 году с борта ОИС «Янтарь». Экспедиция «Арктика – 2024» была организована Федеральным агентством по недропользованию и Главным Управлением глубоководных исследований Минобороны России (ГУГИ). Получены новые данные о рельефе дна, распределении донно-каменного материала, распространении аутигенных карбонатов, строении областей фокусированной разгрузки углеводородных флюидов, а также отдельных морфоструктурных областей региона. Предположительно, изученная область представляет собой значительную по площади провинцию активной газовой разгрузки.

Ключевые слова: *хребет Гаккеля, море Лаптевых, грязевые вулканы, покмарки, аутигенные карбонаты, икаит, метан, нео-пентан*

Введение. По инициативе Роснедр и ГУГИ в августе–сентябре 2024 г. в Северном Ледовитом океане была организована комплексная геолого-геофизическая экспедиция «Арктика–2024». Целью исследований в экспедиции на борту ОИС «Янтарь» являлось проведение батиметрической съемки, а также выполнение геолого-геофизических работ в области сочленения хребта Гаккеля с шельфом моря Лаптевых, являющейся одной из наименее изученных зон хребта. Главной особенностью региона является широкое развитие оползневых процессов и, как следствие, большие мощности осадков, перекрывающих рифтовую долину [Рекант и др., 2021]. Выбор геологических станций осуществлялся по результатам детального анализа рельефа дна, модель которого строилась непосредственно на борту судна по данным многолучевого эхолотирования. Также использовались результаты аналогичных работ, выполненных в экспедиции Арктика-2022 [Каминский и др., 2023; Kaminskiy et al., 2024; Зинченко и др., 2024]. Были обнаружены многочисленные области фокусированной разгрузки углеводородных флюидов, представленные покмарками и структурами, похожими на грязевые вулканы и глиняные диапиры. На поверхности структур находились многочисленные аутигенные карбонатные конкреции, выходы бактериальных матов и черных восстановленных илов. В состав газов входил метан и его гомологи вплоть до нео-пентана.

Материалы и методы. Рельеф дна изучался посредством проведения многолучевого эхолотирования. На основании полученных данных выделялись районы для геологического опробования. Пробоотбор осуществлялся с использованием телеуправляемого необитаемого подводного комплекса (ТНПК), и с помощью прямоточной гравитационной трубки весом 600 кг, общей длиной 4.5 м. Геологические станции были выполнены на трёх полигонах: ПО-1, ПО-2 и ПО-3. Из донных осадков производился отбор газов методом «хэдспейс», и поровых вод специальными шприцами “Rhizon”, оборудованными ядерными фильтрами для очистки собираемой воды от тонких частичек донных осадков и бактерий.

В результате геологических работ были собраны образцы донно-каменного материала (ДКМ) псефитовой размерности, для которых проводилась оценка

петрографического состава и морфологии (окатанность и форма). Окатанность определялась визуально с помощью трафаретов, привязанных к известным коэффициентам Ваделла и Хабакова: 0,11-0,20 и 0 соответственно - неокатанные остроугольные обломки; 0,21-0,40 и 1 соответственно - угловатые или ребристые с заметной потертостью ребер, но с полностью сохраненной исходной огранкой; 0,41-0,60 и 2 соответственно - полуокатанные, сохранившие, несмотря на окатанность, первоначальную неправильную огранку; 0,61-0,80 и 3 соответственно - хорошо окатанные, не имеющие острых углов и ребер, довольно правильные и равномерно обточенные; 0,81-0,90 и 4 соответственно - отлично окатанные с полностью криволинейной сглаженной поверхностью. Форма (сферичность) псефитов устанавливалась по классической методике Цингга (Zingg), согласно которой сначала определялись размеры трех главных взаимно перпендикулярных осей, а потом рассчитывались отношения средней оси (b) к максимальной (a) - степень удлинения - и короткой (c) к средней (b) - степень уплощения. Выделялись следующие формы: I - дисковидные/уплощенные - $c/m > 0,66$, $k/c < 0,66$; II - изометричные - $c/m > 0,66$, $k/c > 0,66$; III - пластинчатые - $c/m < 0,66$, $k/c < 0,66$; IV - брусковидные/цилиндрические - $c/m < 0,66$, $k/c > 0,66$ (табл. 1).

В процессе камеральной обработки выполнялось экспресс-определение химического состава полученного материала с помощью портативного рентгено-флуоресцентного анализатора (РФА) X-MET-7500 производства OXFORD INSTRUMENTS. Портативный РФА позволяет за 1 минуту получить химический состав 28-ми химических элементов.

Результаты и обсуждение. Полигон ПО-1 был назначен на восточном склоне хребта Гаккеля, покрытого батиметрической съёмкой в предыдущей экспедиции «Арктика-22» [Kaminskiy et al., 2024; Зинченко и др., 2024]. Общая морфологическая обстановка в зоне полигона представлена на рис. 1. По результатам сопоставления батиметрических данных экспедиции «Арктика-2022» и мощностей накопленных осадков, вычисленных по данным сейсмических съёмок, в пределах ПО-1 предполагалось наличие выходов коренных пород западного гребня рифтовой долины.

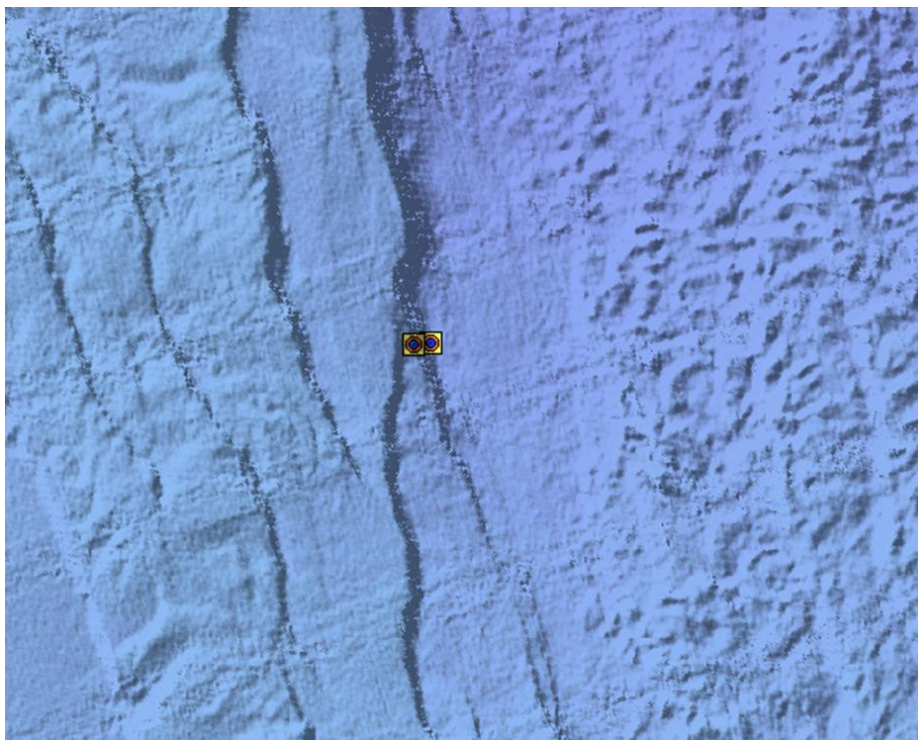


Рис. 1. Общая морфологическая обстановка в зоне полигона ПО-1 и положение профиля пробоотбора с ТНПК.

Установлено, что количество ДКМ на поверхности дна небольшое. Встречающиеся образцы часто плохой окатанности, разного размера. Самые крупные обломки не превышают ~ 40 см, но, как правило, менее ~ 20 см; поверхность псефитов покрыта черными корочками марганца, часто заметны следы «высохших» домиков червей, наросты губок (?). На поверхности крупных ДКМ часто располагались красные креветки. На склоне встречаются небольшие гряды и уступы высотой ~ 5-20 см, являющиеся следами оползней; местами заметны более плотные «корочки», отличающиеся цветовыми оттенками и напоминающие «коросту» - это также признаки оползания более древних осадков. Иногда фрагменты оползней внешне напоминают россыпи ДКМ, однако, имеют более светлый (не черный) цвет и легко ломаются при попытке захвата манипулятором ТНПК. В ряде участков встречались группы лежащих на дне псефитов; в одном из таких мест отобрали сразу 6 образцов. Ближе к вершине террасы ДКМ отсутствовал, часто наблюдалась плотная глиняная «короста» в виде небольших уступов, являющаяся следствием оползания материала по склону. Коренные выходы пород на всём протяжении профиля не были обнаружены.

При проведении пробоотбора манипулятором ТНПК было получено 19 образцов ДКМ. Их краткая характеристика приведена в табл. 1. Основная масса псефитов (11 образцов) представлена неокатанными (6 образцов) или угловатыми (5 образцов) разностями. Шесть образцов относятся к полуокатанным и два образца – к хорошо окатанным. Хуже всего окатаны граниты, лучше всего – базальты (табл. 1). Большинство образцов имеет изометричную (7 обр.) и дисковидную/уплощенную (6 обр.) форму; кристаллический сланец ожидаемо попал в группу пластинчатых форм (табл. 1; рис. 2). Вытянутые разности не характерны для изученных псефитов. В целом морфологическая характеристика псефитов схожа с отмеченной нами ранее для отдельных регионов Арктического бассейна [Крылов и др., 2020; Krylov et al., 2020].

Таблица 1. Морфологическая и петрографическая характеристика ДКМ из ПО-1

Обр.	Размеры по 3 осям, см			Форма по Цинггу	Окатанность		Предварительное название
	а	б	с		Ваделл	Хабаков	
1	23	18	12	II - изометричный	0,255	1	гранодиорит
2	17,5	10,5	8	IV-цилиндрический	0,195	0	гранит
3	13,5	11	6	I - дисковидный	0,215	1	гранит
4	11,5	10	7,5	II - изометричный	0,355	1	гранит
5	12	11	6	I - дисковидный	0,155	0	гранит
6	10	9	6,5	II - изометричный	0,195	0	гранит
7	9,1	9	4	I - дисковидный	0,195	0	гранит
8	7	6	4	II - изометричный	0,355	1	гранодиорит
9	8	5	3,5	IV-цилиндрический	0,555	2	гранодиорит
10	17	11,5	6,8	I - дисковидный	0,415	2	базальт
11	12	10	8	II - изометричный	0,355	1	базальт
12	12	8	6,5	II - изометричный	0,555	2	базальт
13	10	7,5	5	II - изометричный	0,495	2	базальт
14	8,5	5,5	3,5	III - пластинчатый	0,495	2	базальт
15	6	5	4	II - изометричный	0,615	3	базальт
16	10,5	8	4,5	I - дисковидный	0,555	2	глинистый сланец
17	19,5	12	2,5	III - пластинчатый	0,155	0	сланец кристаллический
18	3	2,5	1,5	I - дисковидный	0,115	0	доломит
19	1,6	1	0,9	IV-цилиндрический	0,695	3	песчаник среднезернистый

С учетом того, что коренные выходы пород не были нами обнаружены, вероятнее всего поднятый со дна ДКМ можно отнести к результатам действия ледяного/айсбергового разноса. Действительно, в районе работ нами часто наблюдались айсберги, образованные, вероятно, при деградации ледников из островов архипелага Северная Земля. Плохая окатанность гранитов и гранодиоритов, скорее всего, может быть связана с отсутствием активного волно-прибойного воздействия в областях развития данных пород на суше. Лучшая окатанность базальтов является, вероятно, следствием их длительного нахождения в пляжевой области вблизи источника сноса до захвата льдами трансполярной системы дрейфа.

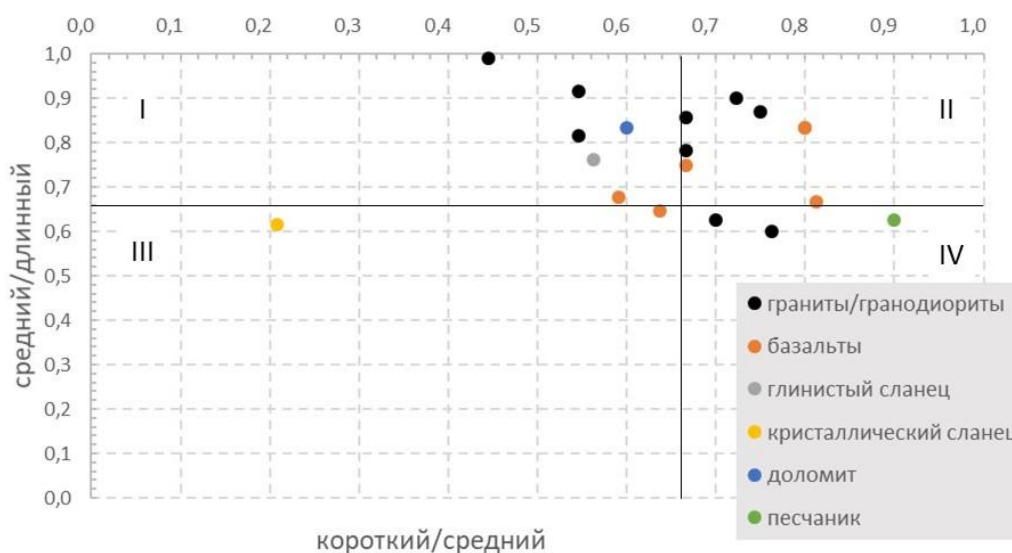
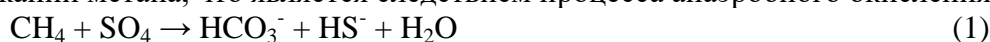


Рис. 2. Форма ДКМ, отобранного в пределах полигона ПО-1.

I – дисковидные/уплощенные, II – изометричные, III – пластинчатые, IV – брусковидные/цилиндрические.

Полигон ПО-2 был назначен на сдвоенном поднятии, впервые обнаруженном в экспедиции Арктика-2024 немного западнее рифтовой долины. Общая морфологическая обстановка в районе полигона представлена на рис. 3. Для исследования было выбрано поднятие, имеющее в своей вершине небольшую кратерообразную депрессию. Структура находилось на глубине 1925 м, и имела высоту 60 м, диаметр около 1 км. Выбор данного объекта для пробоотбора с помощью ТНПК и грунтовой трубки обусловлен его морфологическим сходством со структурами типа грязевых вулканов и/или глиняных диапиров [Mazzini, Etiope, 2017]. С помощью видеофиксации на склоне изученной структуры и в кратере на её вершине обнаружены многочисленные бактериальные маты и выходы на поверхность черных восстановленных илов. На поверхности склона обнаружены аутигенные карбонатные образования сложной изогнутой рогоподобной формы (рис. 4). Необычный облик карбонатов свидетельствует об их росте внутри каналов, по которым происходило движение газонасыщенных флюидов.

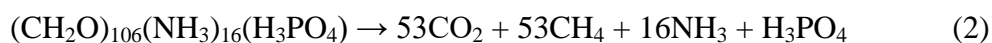
Разрез поднятой на борт судна колонки мощностью 116 см содержал восстановленный газонасыщенный осадок с сильным запахом сероводорода. В интервале 73-76 см обнаружена конкреция аутигенного карбоната размером 1x3 см. Предварительный анализ химического состава поровых вод показал, что сульфат-ион исчезает 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 гомологи метана вплоть до нормального пентана (до 0.11 ppm), изо-пентана (до 320.7 ppm) и нео-

пентана (до 5.2 ppm). Приведенные факты свидетельствуют в пользу того, что изученная структура представляет собой зону фокусированной разгрузки углеводородных флюидов и может являться грязевым вулканом или глиняным диапиром. Известно, что такого рода структуры часто соответствуют зонам разломов или антиклинальным структурам, и располагаются в районах общей тектонической компрессии. Следует отметить, что в районе ПО-2 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.

Известно, что донные отложения Арктики бескарбонатны, а карбонатные отложения никогда не накапливались в синокеанической истории бассейна [Черных, Крылов, 2017]. Это связано с недонасыщенностью поровых вод относительно карбонатных минералов, что в неоген-четвертичное время в значительной степени определяется низкими температурами, повышающими растворимость углекислоты. Из аутигенных карбонатов в осадках Арктики, как правило, формируется икаит ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), устойчивый при низких температурах [Крылов и др., 2015]. Его кристаллизации способствует диагенез органического вещества в зоне сульфат-редукции, поскольку в этом случае в поровую воду выделяется фосфат-ион, являющийся ингибитором кальцита и арагонита:



В изученной нами структуре обнаружены конкреции, сложенные безводными карбонатами кальция, а не икаитом. Это связано с активной разгрузкой метана, окисление которого, согласно реакции (1), приводит к повышению щелочности, но при этом не происходит повышение содержания фосфат-иона. Химический состав образцов карбонатов приведен в таблице 2.

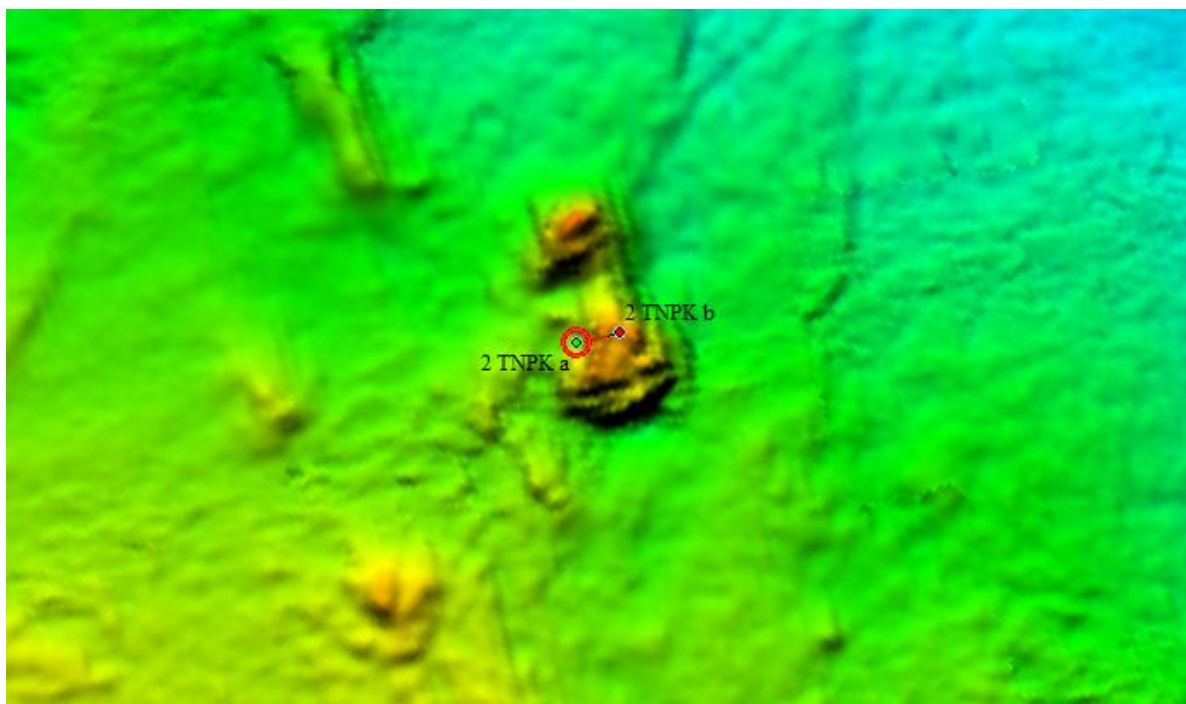


Рис. 3. Расположение галса донного отробования в пределах полигона ПО-2.

Таблица 2. Результаты рентгено-флуоресцентного анализа химического состава аутигенных карбонатов, %

Образец	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO	MnO	MgO	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	S	Sr, ppm	Ba, ppm
A24-2t-01	12,34	4,92	1,94	0,13	0,12	3,13	0,47	35,75	0,24	0,19	682	355
A24-2t-02	14,70	5,00	1,97	0,22	0,17	2,99	0,62	35,07	0,23	0,11	680	660
A24-2t-03	23,78	6,82	2,72	0,46	0,10	3,13	1,16	29,23	0,25	1,12	721	1149



Рис. 4. Образец аутигенной карбонатной конкреции, отобранной с поверхности склона структуры в пределах ПО-2.

Полигон ПО-3 был назначен на западном склоне подводного каньона в пределах южной кромки района «Арктика-2022» (рис. 5). Вблизи полигона расположен сейсмический профиль SL182D16, на котором видно, что в западном борту каньона должна обнажаться слоистая толща коренных пород (рис. 6).

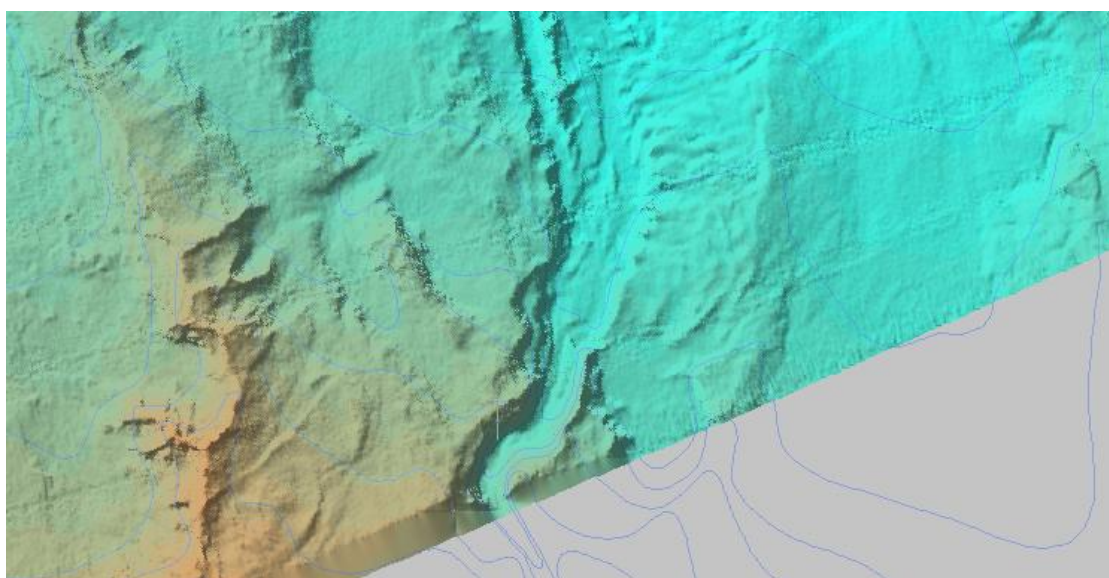


Рис. 5. Общая морфологическая обстановка в зоне полигона ПО-3

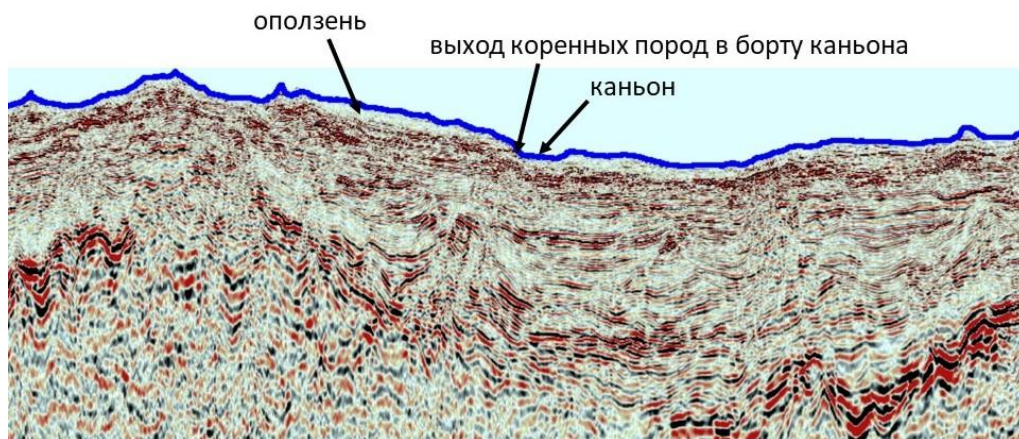


Рис. 6. Выход коренных пород в западном борту каньона. Фрагмент сейсмического профиля SL182D16.



Рис. 7. Фрагменты «древней» аргиллитоподобной глины, обнажающейся в западном борту каньона

По результатам видеофиксации на западном борту каньона установлено наличие многочисленных оползней: уступы сползшей плотной глины, так называемая, глиняная «короста», имеющая более насыщенный серый цвет, по сравнению с основной массой осадка. Попадаются отдельно лежащие блоки плотной глины. Обнаружены «ступени» из плотной аргиллитоподобной глины, напоминающие лестницу. Глина часто рассланцована. Это коренные выходы «древней» (предположительно, неогеновой(?)) аргиллитоподобной глины зеленовато-серого цвета (рис. 7), «слоистая запись» которой видна на сейсмическом профиле SL182D16 (рис. 6). Пласты падают под небольшим углом в северном направлении. На их поверхности часто заметны следы заилинения или оползания.

Заключение. В результате проведенных исследований в экспедиции Арктика-2024 были получены следующие основные результаты.

1) В пределах полигона ПО-1 был обследован восточный склон гребня, расположенного в пределах западного борта рифтовой долины прилаптевоморского сегмента хребта Гаккеля (северная часть батиметрического полигона экспедиции Арктика-2022 [Каминский и др., 2023; Kaminskiy et al., 2024; Зинченко и др., 2024]). В результате видеонаблюдения за дном выходы коренных пород не были обнаружены. Склон покрыт глинистыми отложениями с многочисленными признаками гравитационного оползания материала. На поверхности дна наблюдались как отдельно лежащие, так и небольшие скопления ДКМ псефитовой размерности. Среди отобранных псефитов преобладают граниты/гранодиориты (9 обр.) и базальты (6 обр.). Также было

собрано по одному образцу глинистого сланца, кристаллического сланца, доломита и песчаника. Граниты/гранодиориты, как правило, неокатанные и угловатые, тогда как базальты – полуокатанные. Вероятнее всего, собранный ДКМ был доставлен в район работ льдами/айсбергами. Плохая окатанность гранитов/гранодиоритов, вероятно, связана с тем, что они были захвачены льдами из прибрежного района со слабой гидродинамической активностью, тогда как базальты до инкорпорирования льдами предположительно располагались в активной волно-прибойной (пляжевой) зоне.

2) Полигон ПО-2 расположен в западном районе проведения батиметрической съёмки. Морфология изученной структуры очень близка к грязевым вулканам и глиняным диапирам, которые представляют собой области фокусированной разгрузки углеводородных флюидов. На склоне и в «кратере» исследованной структуры обнаружены белые бактериальные маты, черные восстановленные илы, а также карбонатные конкреции изогнутой рогоподобной формы. Осадки насыщены метаном и его гомологами вплоть до нео-пентана, присутствует сильный запах сероводорода.

Следует отметить, что анализ результатов съёмок многолучевым эхолотом в экспедициях Арктика-2022 и 2024 позволил обнаружить несколько полей, состоящих из структур типа грязевые вулканы/диапиры (положительные формы рельефа) и покмарки (отрицательные формы рельефа); все они связаны с фокусированной разгрузкой углеводородов. Косвенно это подтверждается многочисленными находками метан-производных аутигенных карбонатов в экспедиции Арктика-2022 [Каминский и др., 2023].

3) Полигон ПО-3 был выбран на западном склоне подводного каньона в пределах южной кромки района «Арктика-22» по результатам анализа сейсмического профиля SL182D16, на котором видны выходы слоистой толщи коренных пород в западном борту каньона. Наши исследования подтвердили наличие коренных выходов, сложенных плотной аргиллитоподобной глиной предположительно неогенового (?) возраста.

Благодарности. Участники экспедиции выражают глубокую признательность коллективу Главного Управления глубоководных исследований Минобороны России, экипажу ОИС «Янтарь» за прекрасную организацию экспедиционных работ, постоянную поддержку и теплую товарищескую атмосферу. Исследования А.А. Крылова и Е.А. Логвиной поддержаны грантом РФФ-23-27-00457.

ЛИТЕРАТУРА

Зинченко А.Г., Егоров С.В., Фирсов Ю.Г., Иванов М.В., Колосков Е.Н. Новые данные о рельефе прилаптевоморского сектора континентального склона Евразийского бассейна (по результатам батиметрических съёмок 2022 и 2024 гг.) // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Выпуск 11. С. 146-157. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-146-157

Каминский Д.В., Чамов Н.П., Крылов А.А., Неевин И.А., Буякайте М.И., Дегтярёв К.Е., Дубенский А.С., Каминский В.Д., Логвина Е.А., Окينا О.И., Семёнов П.Б., Киль А.О., Петров О.В., Покровский Б.Г., Толмачева Т.Ю. Первая находка аутигенных карбонатов на прилаптевоморском фланге хребта Гаккеля (Северный Ледовитый Океан) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 2. С. 219-224. doi: 10.31857/S2686739723601102

Крылов А.А., Логвина Е.А., Матвеева Т.В., Прасолов Э.М., Сапега В.Ф., Демидова А.Л., Радченко М.С. Икаит ($\text{CaCO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) в донных отложениях моря Лаптевых и роль анаэробного окисления метана в процессе его формирования // Записки РМО. 2015. № 4. С. 61-75.

Крылов А.А., Малышев С.А., Богин В.А., Захаров В.Ю., Гусев Е.А., Макаров А.С. Особенности распределения псефитового материала в верхнечетвертичных отложениях северной части Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 381-395. doi:10.30758/0555-2648-2020-66-3-381-395

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

Черных А.А., Крылов А.А. Длительность, причины и геодинамическое значение среднекайнозойского перерыва в осадконакоплении в приполюсной части хребта Ломоносова (по материалам бурения IODP-302-ACEX) // Океанология. 2017. Т. 57. № 5. С. 745-756. doi: 10.7868/S0030157417050094

Kaminsky D.V., Chamov N., Zhilin D.M., Krylov A.A., Neevin I.A., Bujakaite M.I., Degtyarev K.E. et al. New Data on the Structure of the Laptev Sea Flank of the Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // Lithology and Mineral Resources. 2024. Vol. 59. Is. 6. P. 598-610. doi: 10.1134/S0024490224700779

Krylov A.A., Matthiessen J., Nam S.-I., Stein R., Bazhenova E.A., Mirolubova E.S., Gusev E.A., Malyshev S.A., Makarov A.S. Origin of the coarse-grained (> 1 cm) clasts from the Mendeleev Ridge area (Central Arctic Ocean) // Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences. 2020. Vol. 65. Is. 4. P. 795–809. doi:10.21638/spbu07.2020.411

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

THE FIRST RESULTS OF RESEARCH ON THE CONNECTION OF THE GAKKEL RIDGE WITH THE LAPTEV SEA SHELF IN THE ARCTIC-2024 EXPEDITION

Kaminskiy D.V.¹, Krylov A.A.¹, Tatarinov V.Yu.², Pilitsyn A.G.², Rogova I.V.¹, Aksenov A.O.³, Semenov P.B.¹, Kil A.O.¹, Lodochnikova A.S.¹, Shatrova E.V.¹, Logvina E.A.¹

¹ VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

² IMGRE, Moscow, Russia

³ Karpinsky Russian Research Geological Institute, St. Petersburg, Russia

The paper presents the preliminary results of studies conducted in 2024 on the Near-Laptev Sea segment of the Gakkel Ridge from the board of the ORV "Yantar". New data has been obtained on the bottom topography, the distribution of bottom rock material, the structure of areas where focused hydrocarbon fluids discharge are discovered, as well as on individual morphostructural zones in the area. It is believed that the studied segment of the Gakkel ridge may represent a significant province for active gas emission.

Keywords: *Gakkel ridge, mud volcanoes, authigenic carbonates*

REFERENCES:

Zinchenko A.G., Egorov S.V., Firsov Yu.G., Ivanov M.V., Koloskov E.N. New data on the relief of the Laptev Sea sector of the continental slope of the Eurasian Basin (based on the results of bathymetric surveys in 2022 and 2024) // Relief and Quaternary formations of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024. Issue 11. P. 146-157. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-146-157

Kaminskiy D.V., Chamov N.P., Krylov A.A., Neevin I.A., Buyakaite M.I., Degtyarev K.E., Dubenskii A.S., Kaminskiy V.D., Logvina E.A., Okina O.I., Semenov P.B., Kil A.O., Petrov O.V., Pokrovskii B.G., Tolmacheva T.Yu. The first discovery of authigenic carbonates on the Laptev Sea Flank of Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 512. Part 2. P. 963-967. doi: 10.1134/S1028334X23601451

Krylov A.A., Logvina E.A., Matveeva T.V., Prasolov E.M., Sapega V.F., Demidova A.L., Radchenko M.S. Ikaite (CaCO₃·6H₂O) in bottom sediments of the Laptev Sea and the role of anaerobic oxidation of methane in the process of its formation // Zapiski RMO. 2015. No. 4. P. 61-75. (in Russ.)

Krylov A.A., Malyshev S.A., Bogin V.A., Zakharov V.Yu., Gusev E.A., Makarov A.S. Features of the coarse clasts (psephites) distribution in the Upper Quaternary sediments of the northern Barents Sea // Arctic and Antarctic Research. 2020. Vol. 66. Is. 3. P. 381-395. doi: 10.30758/0555-2648-2020-66-3-381-395

Rekant P.V., Petrov O.V., Gusev E.A. Model of formation of the sedimentation system of the Eurasian basin of the Arctic Ocean as a basis for reconstruction of its tectonic history // Geotectonics. 2021. No. 5. P. 27-50. doi: 10.1134/S001685212105006X

Chernykh A.A., Krylov A.A. Duration, causes, and geodynamic significance of the middle Cenozoic hiatus in sedimentation in the near-polar part of the Lomonosov Ridge (based on IODP-302-ACEX drilling data) // *Oceanology*. 2017. Vol. 57. Is. 5. P. 675-684. doi: 10.1134/S0001437017050058

Kaminsky D.V., Chamov N., Zhilin D.M., Krylov A.A., Neevin I.A., Bujakaite M.I., Degtyarev K.E. et al. New Data on the Structure of the Laptev Sea Flank of the Gakkel Ridge (Arctic Ocean) // *Lithology and Mineral Resources*. 2024. Vol. 59. Is. 6. P. 598-610. doi: 10.1134/S0024490224700779

Krylov A.A., Matthiessen J., Nam S.-I., Stein R., Bazhenova E.A., Mirolubova E.S., Gusev E.A., Malyshev S.A., Makarov A.S. Origin of the coarse-grained (> 1 cm) clasts from the Mendeleev Ridge area (Central Arctic Ocean) // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. 2020. Vol. 65. Is. 4. P. 795–809. doi:10.21638/spbu07.2020.411

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