

УДК 551.242

## ПЕРВАЯ НАХОДКА АУТИГЕННЫХ КАРБОНАТОВ НА ПРИЛАПТЕВОМОРСКОМ ФЛАНГЕ ХРЕБТА ГАККЕЛЯ (СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН)

© 2023 г. Д. В. Каминский<sup>1</sup>, Н. П. Чамов<sup>2,\*</sup>, А. А. Крылов<sup>1</sup>, И. А. Невин<sup>3</sup>, М. И. Буякайте<sup>2</sup>,  
академик РАН К. Е. Дегтярев<sup>2</sup>, А. С. Дубенский<sup>2</sup>, академик РАН В. Д. Каминский<sup>1</sup>, Е. А. Логвина<sup>1</sup>,  
О. И. Окина<sup>2</sup>, П. Б. Семенов<sup>1</sup>, А. О. Киль<sup>1</sup>, член-корреспондент РАН О. В. Петров<sup>3</sup>,  
член-корреспондент РАН Б. Г. Покровский<sup>2</sup>, Т. Ю. Толмачева<sup>3</sup>

Поступило 18.05.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принято к публикации 23.05.2023 г.

В статье описывается первая находка аутигенных карбонатов на южном фланге хребта Гаккеля в зоне его сочленения с Лаптевоморской континентальной окраиной Российской Федерации. Образцы представлены плотными магнезиальными кальцитами и арагонитами, включающими округлые и угловатые обломки терригенного материала, а также микрофитопланктон разного возраста, споры и пыльцу наземных и водных растений. Элементные и органо-химические характеристики указывают на преобладание окислительных, либо промежуточных между окислительными и восстановительными обстановками кристаллизации карбонатов, что может быть следствием их формирования вблизи поверхности дна. Изотопный состав O, C и Sr позволяет заключить, что диагенетические карбонаты хребта Гаккеля осаждались, преимущественно, в изотопном равновесии с придонной водой при температуре около 0°C, что соответствует замерам с борта судна. Большой разброс значенный  $\delta^{13}\text{C}$  (–23.5 до –37.3) свидетельствует, что метан был важным, но не единственным источником углерода в карбонатах. Широкие вариации отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70906–0.70933), коррелирующие с величинами  $\delta^{13}\text{C}$ , показывают, что карбонат-образующим флюидом была не только современная морская вода, но также диагенетические растворы, поступающие из осадочного чехла совместно с метаном и продуктами окисления метана и органического вещества. Интенсивная разгрузка гетерогенных метаноносных флюидов может быть связана с высокой современной тектонической активностью изученного региона.

*Ключевые слова:* хребет Гаккеля, аутигенные карбонаты, Северный Ледовитый Океан, арагонит, магнезиальный кальцит, метан, геохимия изотопов

**DOI:** 10.31857/S2686739723601102, **EDN:** DXEQIA

Для донных отложений Северного Ледовитого Океана (СЛО) характерно почти полное отсутствие карбонатов, что связано с низкими температурами и недонасыщенностью поровых вод относительно карбонатных фаз. Известны редкие находки аутигенных карбонатов, представленных преимущественно магнезиальными кальцитами и икаитами [2–4, 9, 12, 13], а также сидеритами и родохрозитами [11]. Аутигенные арагониты обна-

ружены во вмещающих перидотитах в северной части хребта Гаккеля, где их кристаллизация объясняется гидротермальными процессами [6].

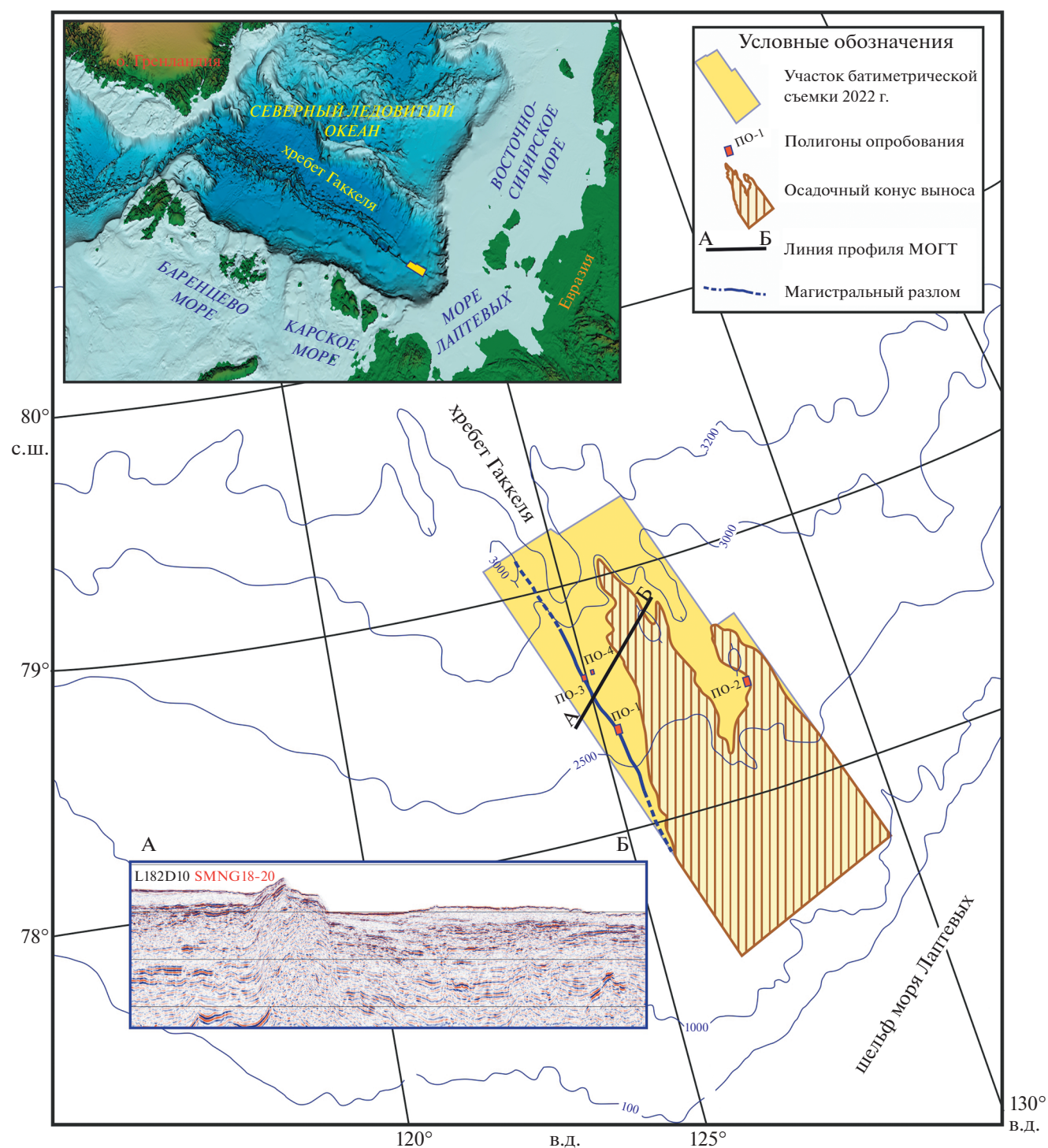
Первая находка аутигенных карбонатов на южном фланге хребта Гаккеля в зоне его сочленения с Лаптевоморской континентальной окраиной России была сделана в ходе специальной морской геологической экспедиции Роснедр и ГУГИ МО РФ “Арктика-2022”. Результаты детальной батиметрической съемки свидетельствуют о существовании протяженной структурно-асимметричной рифтовой долины, к западному борту которой приурочен протяженный магистральный разлом, осложненный на отдельных участках сбросовыми ступенями (рис. 1). В рельефе дна отчетливо выражены характерные для лежачего крыла изостатические воздымания бровок сбросовых уступов и тектонические террасы, об-

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт Океангеология, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Всероссийский Геологический институт, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: Nchamov@yandex.ru



**Рис. 1.** Участок работ экспедиции “Арктика-2022”. На врезке: положение хребта Гаккеля в структуре дна Северного Ледовитого океана.

разованные разобщенными сползшими блоками висячего крыла. Восточный борт рифтовой долины имеет более простое строение. Здесь преобладают деформации изгиба, характерные для областей выхода на дневную поверхность кровли висячего крыла асимметричного полуграбена.

Указанные закономерности отчетливо проявлены на сейсмических профилях.

Интенсивное поступление обломочного материала со стороны шельфа моря Лаптевых приводит к развитию у материкового подножия мощно-



**Рис. 2.** Аутигенные карбонатные образования хребта Гаккеля: а – обр. А22-1т-1, магниальный кальцит; б – обр. А22-8R-2, арагонит.

го конуса выноса, что затрудняет прослеживание структур хребта Гаккеля в сторону континентальной окраины. В то же время существование и рост конуса свидетельствуют о постоянно растущем пространстве аккомодации и, соответственно, прогрессивном погружении южного фланга хребта.

Применение специальных технических средств ОИС “Янтарь” обеспечило возможность визуального изучения дна. С поверхности донных отложений на борту рифтовой долины Гаккеля манипуляторами подводных аппаратов был произведен сбор образцов донно-каменного материала. Среди отобранного материала в пределах четырех геологических станций на трех полигонах (ПО-1, ПО-3, ПО-4) (см. рис. 1) присутствовали 9 образцов аутигенных карбонатов. Максимальный размер составил 50 × 20 × 10 см (образец А22-10R1 из ПО-4). Аутигенные карбонатные образования тяготеют к западному борту рифтовой долины в интервале глубин от 2600 до 3000 м как на склонах, так и в изометричной депрессии (покмарке?) у его основания.

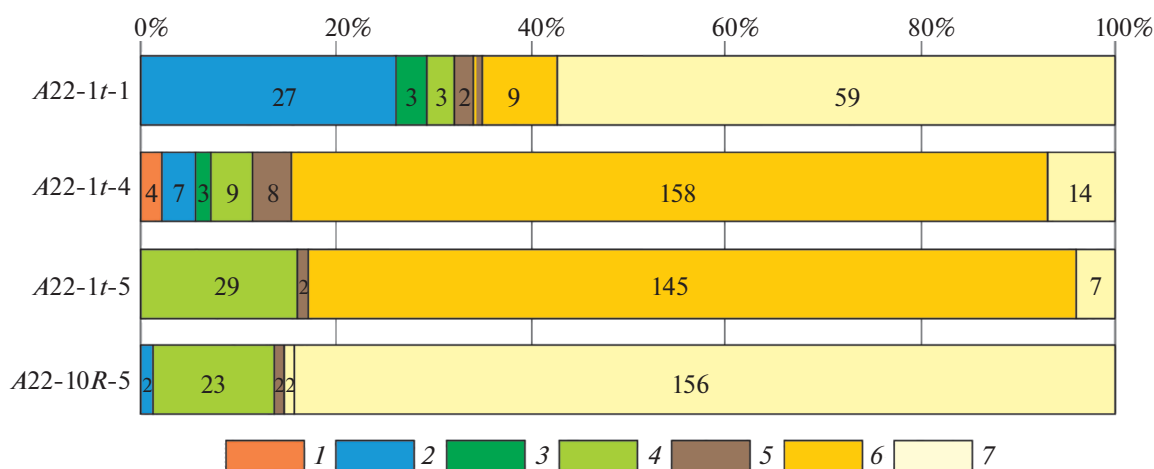
Морфология аутигенных карбонатов сильно варьирует (рис. 2). Они представляют собой плотные образования, выделяющиеся среди обрамляющих нелитифицированных донных осадков, и состоят из прочного матрикса с округлыми и угловатыми обломками местного (эдафогенного) материала. Последний представлен отложениями подводных конусов выноса, часто деформированных оползневыми процессами. Реликты первичной осадочной текстуры отложений конусов выноса (гравитационная сортировка кластики, фрагменты стратификации, ориентированные по напластованию удлиненные обломки терригенных пород) свидетельствуют об аутигенном образовании карбонатов, т.е. кристаллизации на ме-

сте во вмещающем осадке в качестве цемента, отложившегося непосредственно из раствора. Встречаются как единичные образования на пологих участках дна, так и грядобразные скопления карбонатов. Вдоль одной из таких гряд наблюдалась линия отрыва оползня. Некоторые образцы карбонатов, напоминающие уплощенные трубки (например, образец А22-10R1 из ПО-4), могли формироваться в стесненном межпластовом или межсбросовом пространстве под влиянием фокусированной разгрузки флюидов. На это же указывает и наличие внутренних каналов в образцах.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что по минеральному составу аутигенные карбонаты представлены магниальным кальцитом (образцы А22-1т1, А22-1т4 и А22-1т5 из ПО-1; А22-10R1 из ПО-4) и арагонитом (А22-8R1 и А22-8R2 из ПО-3). Все изученные аутигенные карбонаты содержат примесь терригенного материала, который был “захвачен” в процессе их кристаллизации – кварц, глинистые минералы, полевые шпаты, и реже – слюда, амфиболы.

Палинологический и микропалеонтологический анализ на руководящие группы ископаемых показал, что в 9 образцах аутигенных карбонатов встречены споры и пыльца наземных и водных растений, а также микрофитопланктон разного возраста (от юры до квартера), смешанные в разных пропорциях (рис. 3). Очевидно, широкий возрастной диапазон ископаемых относится к терригенному материалу, тогда как осаждение собственно аутигенного (диагенетического) карбонатного цемента, вероятно, происходило в четвертичное время.

Распределение редкоземельных элементов показывает отсутствие каких-либо принципиальных изменений относительно постаршейского



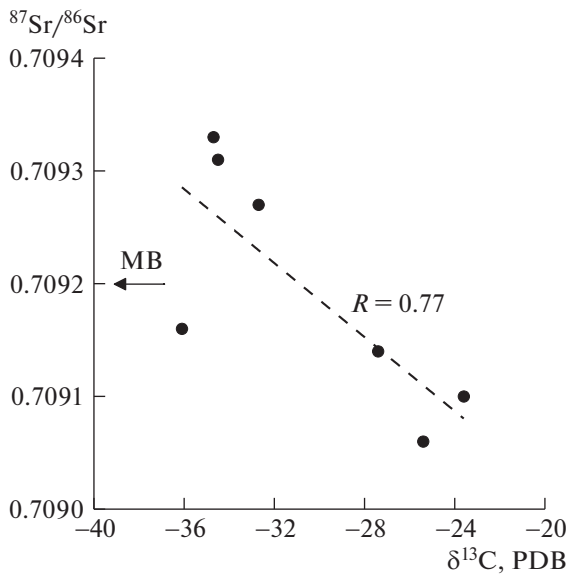
**Рис. 3.** Распределение палиноморф разного возраста в изученных образцах. Цифрами внутри диаграмм показано количество учтенных для статистики экземпляров. (1) Пермь-юра (пыльца); (2) Ранняя юра (диноцисты); (3) Нижний мел (диноцисты, споры); (4) Поздний мел (диноцисты, пыльца); (5) Палеоген (диноцисты); (6) Кайнозой (пыльца); (7) Неоген/квартер (пыльца).

среднего австралийского сланца (РААС). Некоторое обогащение тяжелыми РЗЭ фиксируется для образца А22-8R-1. Отношение Y/No для всех изученных образцов менее 32, что свидетельствует о значительном количестве терригенной (или вулканической) примеси. Цериевая аномалия ( $Ce/Ce^*$ ), типичная для окислительных обстановок (0.64–0.95), отмечается для образцов А-22-8R2, А22-8R1 и А22-10R1. Промежуточные значения между окислительными и восстановительными обстановками измерены в образцах А22-1t5, А-22-1t1 и А-22-1t4.

В двух образцах (А22-8R1 – арагонит и А22-10R1 – Mg-кальцит) было изучено распределение n-алканов и изопреноидов. Концентрации  $C_{орг}$  в указанных образцах составляют 0.12 и 0.52% соответственно. Различие в содержании  $C_{орг}$  более чем в четыре раза может свидетельствовать о неодинаковых обстановках формирования карбонатных построек и различной степени вовлеченности органического вещества (ОВ) в их кристаллизацию. Характер распределения n-алканов демонстрирует очевидное сходство в короткоцепочечной области (C15–C18). В направлении увеличения числа атомов углерода в образце А22-8R1 наблюдается обеднение ОВ n-алканами. В образце А22-10R1 отмечается обратная тенденция – увеличение содержания компонентов C21–C33 с явным доминированием нечетных гомологов (C25, C27, C29, C31), маркирующих вклад терригенного ОВ, поставляемого в морские осадки речным стоком. Локальными максимумами “короткоцепочечного” диапазона (C15–C18) в обоих образцах служат пики C16 и C18. В целом доминирование четных гомологов над нечетными может быть связано с активностью микробиоты в раннем диагенезе [8, 10]. Преобладание фитана над пристаном, особенно выраженное в образце

А22-8R1 ( $Pr/Ph = 0.4$ ), свидетельствует о преимущественно восстановительных условиях седиментации ОВ. Данный вывод противоречит результатам изучения РЗЭ (значения цериевой аномалии), что требует дополнительного анализа. Преобладание n-алканов C17 и C18 над изопреноидами (пристаном и фитаном соответственно), фиксируемое значениями индекса Kiso, не превышающими 1, свидетельствует о диагенетическом уровне зрелости ОВ. Образец А22-8R1 демонстрирует более высокий уровень диагенетической трансформации ОВ ( $Kiso = 0.87$ ) по сравнению с образцом А22-10R1 ( $Kiso = 0.45$ ). На хроматограммах полного экстракта (до разделения на фракции) обоих образцов выявляется характерный пик неразделенной комплексной смеси (Unresolved complex mixture, UCM) с максимумом в области C16–C18. Появление UCM может свидетельствовать об интенсивной переработке биологического ОВ гетеротрофной микробиотой.

Изотопный состав кислорода в 24 образцах аутигенных карбонатов (включая отдельные зоны корок) располагается в интервале значений  $\delta^{18}O$  от 2.0 до 5.9‰ VPDB. ( $\delta^{18}O$  среднее =  $4.3 \pm 0.9\%$  ( $n = 24$ )). Этот разброс может быть связан с несколькими причинами: вариациями  $\delta^{18}O$  в воде, колебаниями температуры, механической примесью карбонатов, сформированных в других условиях, минеральным составом карбонатов (арагонит и магнезиальный кальцит в одинаковых условиях несколько обогащены  $^{18}O$  по сравнению со стандартным кальцитом). Определить соотношение этих факторов не представляется возможным. Принимая для придонной воды моря Лаптевых  $\delta^{18}O = 0.3\%$  (среднее по данным [1]) и используя формулу расчета равновесных температур по [7], среднюю температуру осаждения проанализированных карбонатов можно оценить величи-



**Рис. 4.** Соотношение изотопного состава углерода и стронция в аутигенных карбонатах хребта Гаккеля. МВ – отношение  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в современной морской воде [5].

ной  $1.5 \pm 2.9^\circ\text{C}$ , которая в пределах ошибки не отличается от температур, измеренных с борта судна ( $-0.74 \dots -0.75^\circ\text{C}$ ).

Вопреки ожиданиям, изотопный состав стронция в карбонатах демонстрирует существенный разброс отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70906–0.70933). Очевидно, что в их образовании, наряду с современной морской водой ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70921$  [5]), участвуют растворы, заимствующие стронций из осадочного чехла. Одни из них ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0.70921$ ), несомненно, связаны с терригенной компонентой осадков, другие ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.70921$ ) – либо с древними карбонатами, либо с захороненной в осадках миоценовой или ранне-плейстоценовой морской водой.

Величины  $\delta^{13}\text{C}$  в образцах с хребта Гаккеля варьируют от  $-23.5$  до  $-37.3$  VPDB  $\delta^{13}\text{C}$  среднее =  $-32.2 \pm 4.3\text{‰}$  /24/, свидетельствуя, что в образовании большей их части (с  $\delta^{13}\text{C} < -25\text{‰}$ ) принимали участие продукты окисления метана. Однако чисто “метановые” карбонаты ( $\delta^{13}\text{C} \sim -70\text{‰}$ ), такие, например, как в Чукотском море [2], не обнаружены в Прилаптевоморской части хребта Гаккеля. Большой разброс значений  $\delta^{13}\text{C}$  в карбонатах может быть связан с участием в их образовании наряду с низкотемпературным микробным метаном ( $\delta^{13}\text{C} \sim -70\text{‰}$ ) высокотемпературного термогенного ( $\delta^{13}\text{C} \sim -40 \dots -50\text{‰}$ ), продуктов окисления органического вещества ( $\delta^{13}\text{C} \sim -25\text{‰}$ ), бикарбонат-иона, растворенного в морской воде ( $\delta^{13}\text{C} \sim 0\text{‰}$ ) или в диагенетических флюидах, растворяющих древние карбонаты.

Отрицательная корреляция значений  $\delta^{13}\text{C}$  и отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (рис. 4) подтверждает участие в образовании аутигенных карбонатов хребта Гаккеля как минимум двух источников диагенетических флюидов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На Прилаптевоморском фланге хребта Гаккеля установлены высокая интенсивность оползневых процессов и широкое развитие отложений подводных конусов выноса.

2. Впервые в этом регионе обнаружены многочисленные аутигенные карбонатные образования, сложенные магнезиальным кальцитом и арагонитом с примесью терригенного глинистого материала. В породах присутствуют споры и пыльца наземных и водных растений, а также микрофитопланктон разного возраста (от юры до квартера), смешанные в различных пропорциях. Наиболее вероятно, что формирование собственно аутигенного (диагенетического) карбонатного цемента происходило в четвертичное время. Результаты исследования РЗЭ свидетельствуют о преобладании окислительных, либо промежуточных между окислительными и восстановительными обстановками кристаллизации карбонатов, что может быть следствием их формирования вблизи поверхности дна.

3. Высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$  (среднее =  $4.3 \pm 0.9\text{‰}$ ) позволяют заключить, что диагенетические карбонаты хребта Гаккеля осаждались, преимущественно, в изотопном равновесии с придонной водой при температуре около  $0^\circ\text{C}$ , что соответствует замерам с борта судна. Величины  $\delta^{13}\text{C}$  в карбонатах варьируют от  $-23.5$  до  $-37.3$  VPDB, свидетельствуя, что в их образовании наряду с продуктами окисления метана принимали участие продукты окисления органического вещества и, возможно, бикарбонат, растворенный в морской воде. Широкие вариации отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70906–0.70933) показывают, что карбонат-образующим флюидом была не только современная морская вода, но также диагенетические растворы, поступавшие из осадочного чехла совместно с метаном и продуктами окисления метана и органического вещества. Отрицательная корреляция  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  свидетельствует о наличии по крайней мере двух принципиальных источников карбонат-образующих растворов.

### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзаданий ВНИИОкеангеология, ГИН РАН и ВСЕГЕИ. Исследования А.А. Крылова и Е.А. Логвиной поддержаны грантом РНФ-23-27-00457.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дубинина Е.О., Мирошников А.Ю., Коссова С.А., Шука С.А. Модификация опресненных вод на шельфе моря Лаптевых: связь изотопных параметров и солености // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 3–19.
2. Колесник О.Н., Колесник А.Н., Покровский Б.Г. О находке аутигенного метанопродуктивного карбоната в Чукотском море // Доклады академии наук. 2014. Т. 458. № 3. С. 330–332.
3. 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.
4. Крылов А.А., Логвина Е.А., Матвеева Т.В. и др. Икаит ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) в донных отложениях моря Лаптевых и роль анаэробного окисления метана в процессе его формирования // Записки РМО. 2015. № 4. С. 61–75.
5. Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Изотопный состав Sr в водах Мирового океана, окраинных и внутренних морей: возможности и ограничения Sr-изотопной стратиграфии // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 6. С. 3–19.
6. Eickmann B., Bach W., Rosner M., Peckmann J. Geochemical constraints on the modes of carbonate precipitation in peridotites from the Logatchev Hydrothermal Vent Field and Gakkel Ridge // Chemical Geology. 2009. V. 268. P. 97–106.
7. Epstein S., Buchsbaum R., Lowenstam H. A., Urey H. C. Revised carbonate-water temperature scale // Geological Society of America Bulletin. 1953. V. 62. P. 417–426.
8. Imfeld A., Ouellet A., Douglas P., et al. Molecular and stable isotope analysis ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) of sedimentary n-alkanes in the St. Lawrence Estuary and Gulf, Quebec, Canada: importance of even numbered n-alkanes in coastal systems // Organic Geochemistry. 2022. V. 164. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2022.104367>
9. Kodina L.A., Tokarev V.G., Vlasova L.N., Korobeinik G.S. Contribution of biogenic methane to ikaite formation in the Kara Sea: Evidence from the stable carbon isotope geochemistry // In: R. Stein (eds). Siberian river run-off in the Kara Sea. Proc. In Marine Science. V. 6. Elsevier, 2003. P. 349–374.
10. Lein Yu., Makkaveev P. N., Savvichev A.S., et al. Transformation of suspended particulate matter into sediment in the Kara Sea in September of 2011 // Oceanology. 2013. V. 53 (5). P. 570–606.
11. Logvina E., Krylov A.A., Taldenkova E. et al. Mechanisms of Late Pleistocene authigenic Fe-Mn-carbonate formation at the Laptev Sea continental slope (Siberian Arctic) // Arktos. 2018. V. 4. P. 1–13.
12. Rogov M., Ershova V., Gaina C., Vereshchagin O., et al. Glendonites throughout the Phanerozoic // Earth-Sci Rev. 2023. V. 241. P. 1–32.
13. Ruban A., Rudmin M., Mazurov A., et al. Cold-seep carbonates of the Laptev Sea continental slope: constraints from fluid sources and environment of formation // Chemical Geology. 2022. V. 610. P. 1–13.

## FIRST DISCOVERY OF AUTHIGENIC CARBONATES ON THE LAPTEV SEA FLANK OF THE GAKKEL RIDGE (ARCTIC OCEAN)

D. V. Kaminsky<sup>a</sup>, N. P. Chamov<sup>b, #</sup>, A. A. Krylov<sup>a</sup>, I. A. Neevin<sup>c</sup>, M. I. Bujakaite<sup>b</sup>,  
Academician of the RAS K. E. Degtyarev<sup>b</sup>, A. S. Dubensky<sup>b</sup>, Academician of the RAS V. D. Kaminsky<sup>a</sup>,  
E. A. Logvina<sup>a</sup>, O. I. Okina<sup>b</sup>, P. B. Semenov<sup>a</sup>, A. O. Kiel<sup>a</sup>, Corresponding Member of the RAS O. V. Petrov<sup>c</sup>,  
Corresponding Member of the RAS B. G. Pokrovsky<sup>b</sup>, and T. Yu. Tolmacheva<sup>c</sup>

<sup>a</sup>All-Russian Science Research Institution Okeangeologiya, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>c</sup>All-Russian Geological Institution, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: Nchamov@yandex.ru

The article describes the first find of authigenic carbonates on the southern flank of the Gakkel Ridge in the zone of its junction with the Laptev Sea continental margin of the Russian Federation. The samples are represented by dense magnesian calcites and aragonites, including rounded and angular fragments of terrigenous material, as well as microphytoplankton of different ages, spores and pollen of terrestrial and aquatic plants. Elemental and organochemical characteristics indicate the predominance of oxidizing or intermediate between oxidizing and reducing conditions of carbonate crystallization, which may be a consequence of their formation near the bottom surface. The isotopic composition of O, C, and Sr allows us to conclude that the diagenetic carbonates of the Gakkel Ridge were deposited mainly in isotopic equilibrium with bottom water at a temperature of about 0°C, which corresponds to measurements from the ship. A wide range of  $\delta^{13}\text{C}$  (–23.5 до –37.3) indicates that methane was an important, but not the only source of carbon in carbonates. The wide variations in the  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (0.70906–0.70933), which correlate with the  $\delta^{13}\text{C}$  values, show that the carbonate-forming fluid was not only modern sea water, but also diagenetic solutions coming from the sedimentary cover together with methane and the products of methane and organic matter oxidation. Intense discharge of heterogeneous methane-bearing fluids may be related to the high modern tectonic activity of the studied region.

**Keywords:** Gakkel Ridge, authigenic carbonates, Arctic Ocean, aragonite, magnesian calcite, methane, isotope geochemistry