

ЛИТОЛОГИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОСАДКОВ В РАЙОНЕ РАЗГРУЗКИ ФЛЮИДОВ В КАРСКОМ МОРЕ

© 2025 г. Е. А. Мороз^{1,*}, Е. А. Еременко^{1,2}, А. В. Ермаков¹, А. П. Денисова¹,
А. В. Драздова¹, Р. А. Ананьев³, В. В. Архипов⁴, С. В. Мазнев⁵

Представлено академиком РАН К.Е. Дегтяревым 23.04.2025 г.

Поступило 23.04.2025 г.

После доработки 25.04.2025 г.

Принято к публикации 28.04.2025 г.

Представлены результаты литолого-geoхимического анализа донных осадков, отобранных в юго-западной части Карского шельфа в области развития процессов дегазации в затопленной палеодолине на глубине 112 м. Установлено, что накопление голоценовых морских осадков происходило в условиях притока флюидов в результате деградации многолетнемёрзлых пород и деструкции содержащихся в них газогидратов, являющихся, по-видимому, поставщиками изотопно-тяжёлых вод в изученную толщу.

Ключевые слова: дегазация, газовые факелы, сейсмоакустика, газогидраты, изотопный состав воды, гранулометрический анализ, многолетняя мерзлота

DOI: 10.31857/S2686739725080034

Режим и скорости осадконакопления в юго-западной части Карского шельфа в течение позднего плейстоцена и голоцена неоднократно переревали изменения, связанные с колебаниями уровня моря, а также вариациями степени участия речного и ледникового стока в поступлении взвеси. Дополнительным фактором, усложнившим строение верхней части осадочного разреза, явился криогенез, охвативший шельфовые пространства в сартанское время (18–23 тыс. л.н., МИС 2). Вопрос о положении уровня Карского моря в период последней крупной регрессии остаётся дискуссионным. Высказываются мнения о падении уровня моря до современных отметок дна 30–50 м [1], 40–60 м [2], 110–130 м [3] и др. В голоцене уровень моря постепенно повышался, на затапливаемых пространствах суши

началось накопление морских осадков. Скорости осадконакопления в голоцене латерально дифференцированы, количественные оценки их разнятся. Максимальные скорости в центральной части юго-западного сектора Карского моря не превышали 0.5 мм/год [4]. По данным изотопного датирования на территории юго-запада Карского шельфа в целом в последние 250 лет они изменяются от 0.8–1.0 см/год в терригенно-эстuarных обстановках до 0.1–0.3 см/год в терригенно-мелководно-морских обстановках [5].

Изучение литологического состава и geoхимии голоценовых осадков позволяет не только реконструировать обстановки их накопления, но также устанавливать вероятные источники привноса взвеси и характер постседиментационных изменений осадка *in situ*, связанных, в том числе, с процессом дегазации, широко развитым в арктических морях. Признаки подъёма флюидов в верхней части осадочного чехла и в водной толще в пределах Баренцево-Карского региона хорошо идентифицируются по сейсмоакустическим данным [6, 7]. В то же время, характер влияния подъёма флюидов на литолого-geoхимические свойства голоценовых морских осадков изучен в шельфовых обстановках локально. Так, по результатам исследования колонки донных осадков в приямальской области юго-запада Карского моря установлено, что флюиды

¹Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

³Институт Океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

⁴Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

⁵Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*E-mail: morozzea@gmail.com

содержат пресную воду, которая образуется в результате деградации толщи многолетнемёрзлых пород (ММП) [8].

Одним из признаков разгрузки флюидов считается новообразование аутигенных карбонатов, в частности икаита, в донных осадках. Икаит весьма типичен в осадках холодноводных морей [9], образуется в восстановительных условиях и свидетельствует о наличии в осадках свободного газа [6]. В частности, икаиты в центральной части Карского шельфа были обнаружены на тех же глубинах, где на сейсмоакустических профилях зачастую фиксировалось освещение сейсмической записи, интерпретируемое как газовый фронт или кровля ММП [6]. Икаиты, обнаруживаемые в донных осадках арктических морей, могут свидетельствовать о процессах деградации ММП в настоящее время [10].

Целью исследования являлась реконструкция условий формирования донных осадков в пределах участка развития дегазации на борту крупной палеодолины в юго-западной части Карского шельфа и выявление потенциального вклада процесса деградации ММП в поступление флюидов.

В работе использованы батиметрические данные, полученные на многолучевом эхолоте Reson Seabat 8111 с частотой сигнала 100 кГц в 52 рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2021 г. Акустическое профилирование выполнено на профилографе Parasound P-35 с частотой сигнала 4–8 кГц (осадочный чехол) и 18–21 кГц (водная толща). Процесс выявления и пикировки акустических аномалий, связанных с наличием газа в верхней части осадочного чехла, осуществлялся в программном пакете Kingdom Suite 2015. Керновый материал исследованной колонки ANS5206 отобран ударной грунтовой трубкой (УГТ-147), первично описан в судовой лаборатории, после чего методом субкоринга отобран по всей длине колонки, хранился и транспортировался до лаборатории в холодильнике.

Комплексный анализ выполнен в лаборатории тепломассопереноса Геологического института РАН и на кафедре геоморфологии и палеогеографии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Он включал измерение магнитной восприимчивости портативным каппа-метром SM-30; определение теплопроводности прибором Tempos; определение влажности весовым методом высушиванием в сушильном шкафу при 105°C до постоянной массы; определение содержания CaCO_3 (разложением с добавлением 10%-го раствора HCl); определение

содержания органического вещества (разложением с добавлением H_2O_2); гранулометрический анализ на лазерном дифракционном гранулометре Analysette 22 MicroTec Plus; выделение поровых вод и их изотопный анализ. При проведении изотопного анализа пробы отбирались из внутренней части субкоринга. Центрифугирование проводилось в день отбора пробы в течении 15 минут на скорости 3000 об./мин., при этом нагревания проб выше стандартных условий не происходило. Выделившаяся вода (1–2 мл) отбиралась стерильным шприцом и помещалась в виалу с микровставкой объёмом 300 мкл. Изотопный анализ выполнялся на лазерном инфракрасном спектрометре Picarro L2140i. В лаборатории используются стандарты USGS-46, USGS-47, USGS-48, а также внутренние лабораторные стандарты БРЗ-21 ($\delta D = -133.21\text{\textperthousand}$; $\delta^{18}\text{O} = -18.27\text{\textperthousand}$), Ф-21 ($\delta D = -41.9\text{\textperthousand}$; $\delta^{18}\text{O} = -6.36\text{\textperthousand}$) и М-21 ($\delta D = 1.5\text{\textperthousand}$; $\delta^{18}\text{O} = 0.49\text{\textperthousand}$), откалиброванные относительно V-SMOW. Точность измерений составляет до 0.05% для $\delta^{18}\text{O}$ и до 0.2% для δD .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Колонка осадков ANS5206 (74.0577 с.ш., 67.2726 в.д.) мощностью 3.35 м отобрана с глубины 112 м в пределах вытянутой в субмеридиональном направлении депрессии (затопленной палеодолины), прорезающей северный склон Русановской структурной террасы к западу от Ямальско-Гыданской отмели (рис. 1 а). Палеодолина имеет чёткие бровки, ширину 5–6 км, глубину – до 250 м. На её восточном борту выражена террасовидная поверхность на глубине 110–115 м (см. рис. 1 б). Слагающие её осадки характеризуются в верхней части хорошей акустической стратифицированностью (рис. 2 а). На глубине около 10 м по сейсмоакустическим данным установлено наличие аномалии типа “яркое пятно” (газовый фронт), ниже которой фиксируется акустическое освещение. Признаки дегазации отмечены и в водной толще над террасовидной поверхностью. Они выражены в виде акустических аномалий типа “факел” (высотой 20–30 м) и появлении участков повышенной акустической мутности воды (см. рис. 2 б). По совокупности сейсмоакустических признаков можно заключить, что на обследованном участке происходит подъём флюидов в верхнюю часть осадочного чехла и водную толщу. Колонка ANS5206 отобрана непосредственно на описанной террасовидной поверхности в месте, где в водной толще зафиксированы аномалии

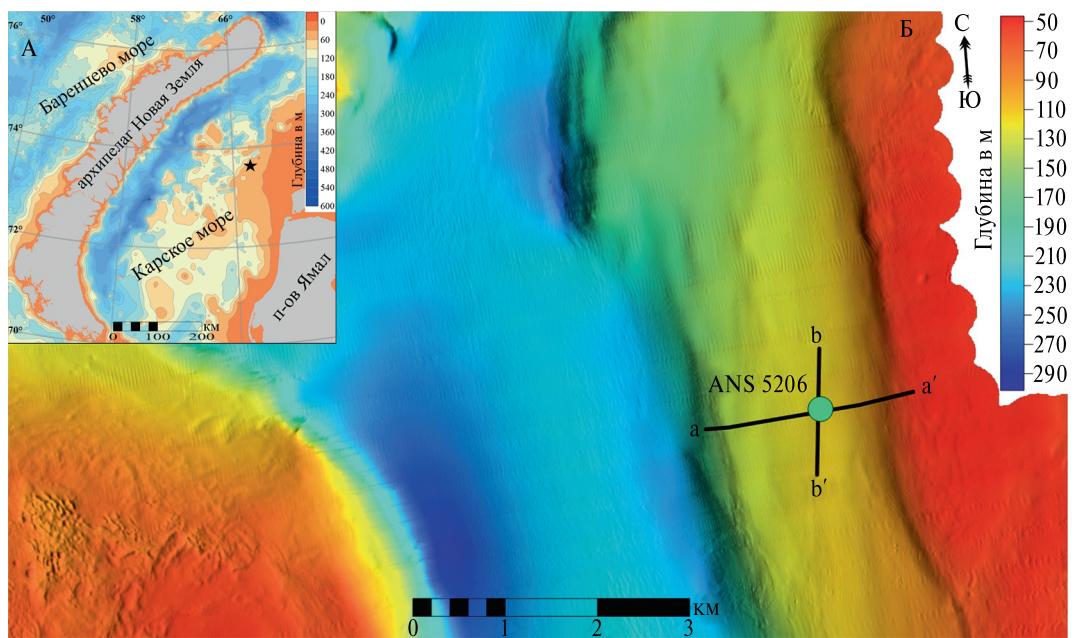


Рис. 1. Местоположение полигона (А, показан звездочкой) и цифровая модель рельефа дна (Б)

типа “факел”. Они были обнаружены впервые в 2021 г., а затем повторно – в 2023 г. в ходе 56 рейса НИС “Академик Николай Страхов”.

Отобранный толща донных осадков по гранулометрическому составу и текстуре разделяется на четыре слоя. Верхние три (сл. 1, 2 и 3, рис. 3) представлены оливково- и зеленовато-серыми пелитовыми илами с примесью тонкозернистого песка, однородной и линзовидно-слоистой текстурой, нижний (сл. 4) – серовато-оливковой пелитовой глиной с линзовидно-слоистой текстурой. В гранулометрическом составе осадков преобладает алеврит (фракция >5–50 мкм). Его содержание составляет 55–80%. Содержание глинистой фракции (<5 мкм) изменяется от 15 до 25%, песчаной – не выходит за пределы 3–4%, снижаясь в слое 4 до менее 1%, и лишь в двух интервалах достигая 22% (интервал 30–32 см) и 7.9% (интервал 170–172 см). Гранулометрические спектры исследованных осадков унимодальные с максимумами в области среднего алеврита.

В сл. 1 присутствуют трубки полихет диаметром 2 мм и длиной до 15 см. По всей длине колонки наблюдаются рассеянные включения и тонкие прослои гидротроилита – аутигенного сульфида железа, который заполняет поры в алеврито-глинистых осадках. Присутствие гидротроилита отражает изменения в окислительно-восстановительных условиях при неравномерной седиментации, а также активности анаэробных сульфатредуцирующих микроорганизмов [11]. В слоях

2, 3 и 4 встречены единичные раковины двустворок и детрит (на глубине 62 и 177 см). На глубине 187–190 см в колонке обнаружен кристалл икита ($\text{CaCO}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$) размером $6 \times 2 \times 2$ см. В слое 4 на глубине более 280 см замечены пузырьковые включения и бугорки, вероятно, указывающие на эмиссию газа в результате декомпрессии.

Содержание карбонатов в колонке ANS5206 изменяется вниз по разрезу от 4 до 15%, в верхней части до глубины 1.5 м образуя плавный размазанный пик в слое 2. Содержание органического вещества нарастает с глубиной от 2 до 4–4.5%. Магнитная восприимчивость в среднем составляет менее $16 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ, с максимумами до $20 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ в верхних 0.5 и нижних 1 м разреза. Теплопроводность демонстрирует нормальную обратную зависимость от влажности. Изотопный состав характеризуется постепенным снижением $\delta^{18}\text{O}$ и δD в слоях 1, 2 и 3 и в верхней части слоя 4 ($\delta^{18}\text{O}$ изменяется от 2.3‰ до –1.6‰, δD – от 2.1‰ до –21‰). С глубины 3.16 м и до 3.34 м отмечен резкий рост $\delta^{18}\text{O}$ до 5.51‰ и δD до –9.78‰.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В строении осадочного чехла, изученного в колонке ANS5206, можно выделить две толщи. Верхняя, включающая слои 1, 2 и 3 характеризуется относительно большим содержанием алеврита и тонкозернистого песка, направленным трендом увеличения карбонатности

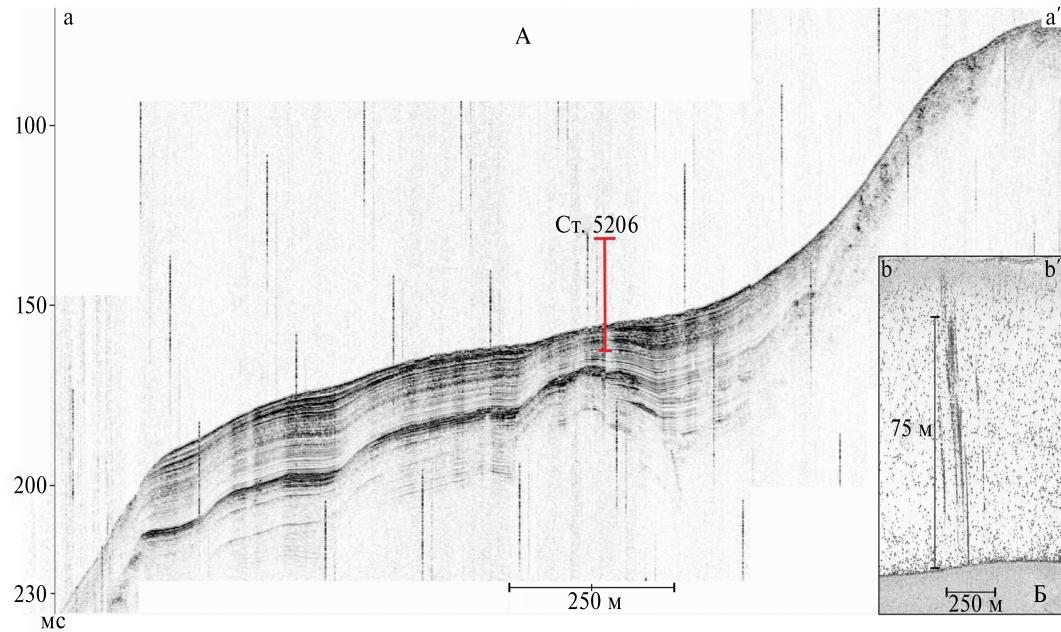


Рис. 2. Сейсмоакустический профиль и местоположение колонки ANS5206 (А), акустические аномалии типа “факел” в одной толще (Б). Положение профилей показано на рис. 1

и содержания органического вещества вниз по разрезу. При этом вариабельность свойств в целом повышается сверху вниз по разрезу, что может указывать на более активную гидродинамическую обстановку в начале накопления верхней толщи (слой 3). Нижняя толща (слой 4) характеризуется большей глинистостью, плотностью, практически полным отсутствием песчаных фракций и повышенным содержанием органики. Условия её накопления отличались более спокойным гидродинамическим режимом. Можно предположить, что слои 1, 2 и 3 образовались в голоцене: направленное изменение литологического состава (в частности, содержания органики) указывает, по-видимому, на постепенное увеличение глубины бассейна в период трансгрессии. Прослой песка, зафиксированный близ подошвы слоя 1, вероятно, свидетельствует об участии придонных течений в седиментации. Формирование слоя 4 происходило в более тёплой обстановке со сниженной гидродинамикой (возможно, в каргинское время, 23–50 (55) тыс. л. н., МИС 3). Вероятно, именно слой 4 в силу присущей высокой плотности и, как следствие, низкой проницаемости является флюидоупором, ниже которого на сейсмоакустическом профиле зафиксирован газовый фронт на глубине около 10 м.

Присутствие в колонке икаита, вкупе с зафиксированными признаками дегазации на сейсмоакустических профилях, указывает, с одной

стороны, на возможность присутствия свободного газа в осадках [6], а с другой – на близкие к нулю температуры грунтов. По имеющимся данным [12], в пределах изучаемого района распространены островные ММП. На глубинах 50–60 м за бровками палеодолины их наличие фиксируется на сейсмических профилях, а в днище долины ММП, по-видимому, отсутствуют. Формирование икаитов в толще донных грунтов, вероятно, связано с поступлением флюидов в верхнюю часть разреза, в том числе, в результате деградации ММП на прилегающих пространствах шельфа.

Изотопный состав поровых вод в донных осадках существенно отличается как от вод открытых пространств Карского моря, так и от пресных вод прилегающей суши [13]. Выявленное утяжеление состава вод ($\delta^{18}\text{O}$ до 5.51‰ и δD до –9.78‰) в верхней и, в особенности, в нижней части колонки может быть связано с деградацией ММП и разрушением содержащихся в ней газогидратов. Поровые воды гидратсодержащих слоёв [14] и донных осадков в районах разгрузки флюидов характеризуются тяжёлым составом [15]. На процесс деструкции газовых гидратов в изученном районе может указывать, в том числе, формирование в осадках икаита [16]. Кроме того, если предположить осушение террасовидной поверхности в период сартанской регрессии, то утяжеление поровых вод в слое 4 могло быть связано

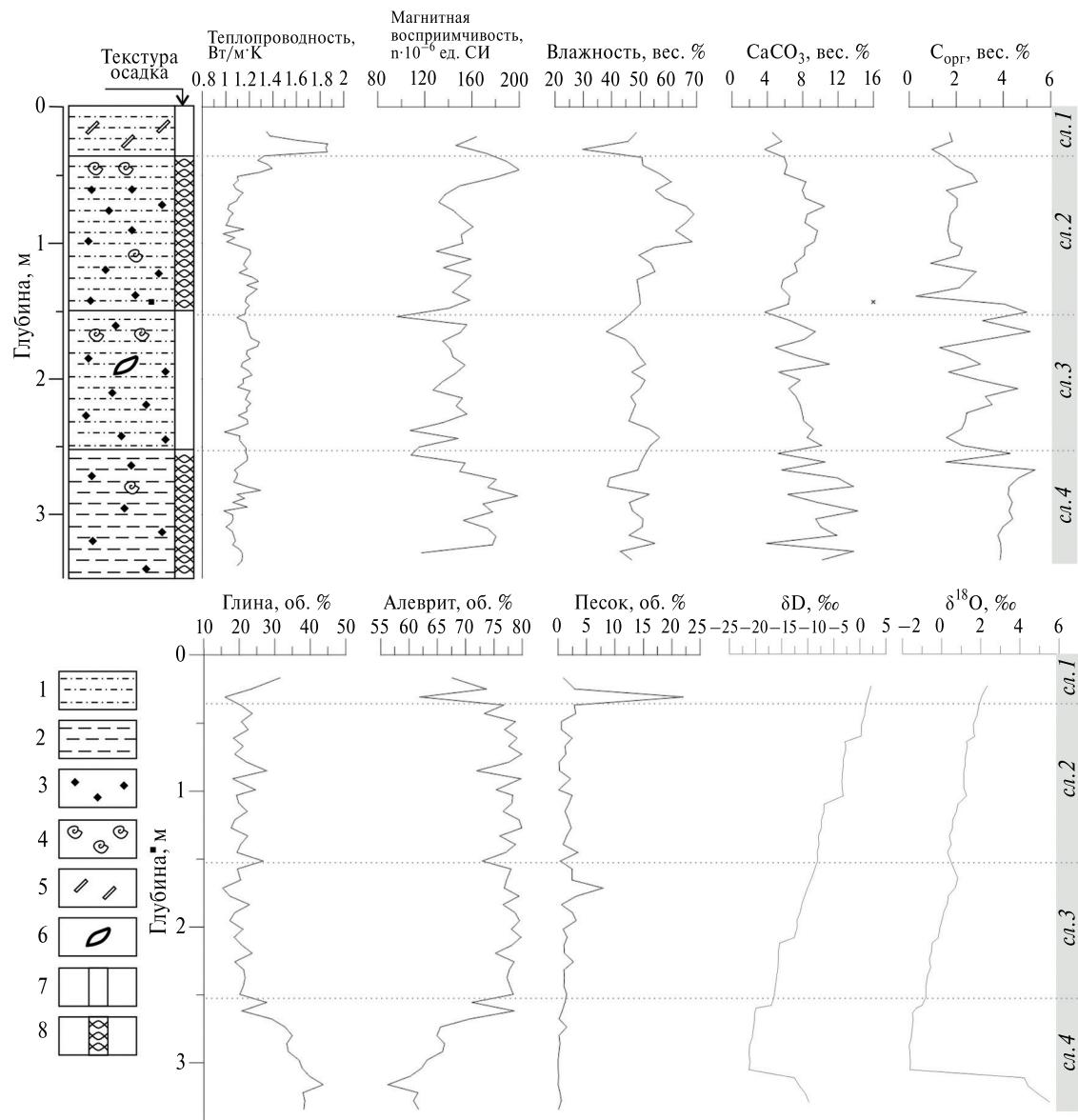


Рис. 3. Литологический состав, физико-химические свойства и изотопный состав донных осадков колонки ANS5206. Условные обозначения: 1 – пелитовый ил с примесью тонкозернистого песка, 2 – пелитовая глина, 3 – включения гидротроилита, 4 – раковины и дретрит, 5 – трубы полихет, 6 – кристалл икаита, 7 – однородная текстура осадка, 8 – линзовидно-слоистая текстура осадка

и с постседиментационными процессами в суббаэральной обстановке (к примеру, с иссушением толщи при промерзании [17]). При последующем затоплении в голоцене ММП деградировали, и в верхнюю часть слоя 4 просачивалась морская вода, что привело к облегчению состава. На начальных этапах трансгрессии вклад речного стока в седиментогенез был, вероятно, выше, чем в более позднее время, на это указывает общий тренд изменения изотопного состава вверх по разрезу. В то же время, утяжеление состава поровых вод в слоях 1 и 2 ($\delta^{18}\text{O}$ до 2.3‰ и δD до 2.2‰), накопившихся в голоцене в морской

обстановке, указывает на то, что исключительно суббаэральным криогенезом выявленные значения в слое 4 объяснить нельзя. Вероятно, оба описанных механизма могли участвовать в формировании изотопного состава поровых вод в изученной колонке.

ВЫВОДЫ

Имеющиеся данные позволяют предположить, что накопление голоценовых морских осадков в пределах палеодолины в юго-западной части Карского шельфа на глубинах около

100 м происходило в условиях притока флюидов в результате деградации ММП и деструкции содержащихся в них газогидратов. Непрерывный характер притока флюидов к поверхности дна и в водную толщу, который был зафиксирован по сейсмическим данным в 2021 и 2023 гг., позволяет говорить о продолжающемся процессе дегазации, оказывающем влияние на изотопный состав поровых вод верхних горизонтов осадочного разреза.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность экипажам 52-го и 56-го рейсов НИС “Академик Николай Страхов” за содействие в проведении морских работ.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 “Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и её влияние на рельеф и донные отложения”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Данилов И.Д., Жигарев Л.А.* Некоторые аспекты морской криологии арктической литорально-шельфовой зоны // Географические проблемы изучения Севера. М.: Изд-во МГУ, 1977. С. 115–135.
2. *Мусатов Е.Е., Соколов Г.Н.* Геоморфология Южно-Карского шельфа // Геоморфология. 1992. № 2. С. 95–91.
3. *Галушкин Ю.И.* Вариации климата в истории формирования Южно-Карского бассейна // Жизнь Земли. 2023. № 4. С. 490–504.
4. *Медведев В.С., Потехина Е.М.* Количественное распределение и динамика взвеси в юго-западной части Карского моря / В кн.: Современные процессы осадконакопления на шельфах мирового океана. М., 1990. С. 110–120.
5. *Русаков В.Ю., Борисов А.П., Соловьева Г.Ю.* Скорости седиментации (по данным изотопного анализа ^{210}Pb и ^{137}Cs) в разных фациально-генетических типах донных осадков Карского моря // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1158–1174.
6. *Гусев Е.А., Матюшев А.П., Рудой А.С., Усов А.Н.* Четвертичные отложения центральной части Карского моря / Опыт системных океанологических исследований в Арктике. Под ред. А.П. Лисицына и др. М.: Научный мир, 2001. С. 553–558.
7. *Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Агранов Г.Д. и др.* Проявления дегазации в верхней части осадочного разреза Печорского моря и ее связь с тектоникой // Доклады РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 91–96.
8. *Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al.* Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the sub-sea permafrost outer border in the South Kara Sea // Geochemistry. 2020. V. 80. No. 3. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2019.04.005>
9. *Крылов А.А., Логвина Е.А., Гусев Е.А.* Икаиты в современных отложениях Карского моря / Фундаментальные проблемы изучения вулканогенно-осадочных, теригенных и карбонатных комплексов. Матер. Всерос. науч. конф. М.: ГЕОС. 2023. С. 85–87.
10. *Логвина Е.А., Крылов А.А., Гусев Е.А. и др.* Особенности формирования икаита в Карском море // Гетерогенность в осадочных системах / Матер. 14-го Уральск. литол. Совещ. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии им. Акад. А.Н. Заваричского, 2024. С. 243–245.
11. *Ферронский В.И., Поляков В.А., Куприн П.Н., Власов Л.С.* Гидротроилит как биоиндикатор палеогидрологических и палеоклиматических процессов в бассейне Каспийского моря // Водные ресурсы. 2014. Т. 41. № 4. С. 439–455.
12. *Гаврилов А.В., Павлов В.А., Фриденберг А.И. и др.* Геокриологическое картографирование шельфа Карского моря. Методика и результаты // Нефтяное хозяйство. 2019. № 11. С. 28–32.
13. *Косова С.А.* Вариации изотопного состава кислорода и водорода ($\delta^{18}\text{O}$, δD) морских вод и изучение источников опреснения арктических морей на примере заливов Карскоморского побережья архипелага Новая Земля. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-мин. н. М., 2021. 140 с.
14. *Иванов М.В., Леин А.П.* Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
15. *Blinova V.N., Comas M.C., Ivanov M.K. et al.* Active mud volcanism in the West Alboran Basin: Geochemical evidence of hydrocarbon seepage // Marine and Petroleum Geology. 2011. V. 28. No. 8. P. 1483–1504. <https://doi.org/10.1016/j.marpgeo.2011.06.001>
16. *Крылов А.А., Логвина Е.А., Семёнов П.Б. и др.* Кристаллизация икаитов и их возможная связь с газовыми гидратами // Газовые гидраты – энергия будущего / Материалы Перв. Рос. Газогидр. Конф. 2024. С. 162–166.
17. *Конищев В.Н., Рогов В.В., Голубев В.Н., Сократов С.А.* Изотопный состав связной воды и льдов мерзлых толщ / Материалы Четвертой конф. геокриологов России. М.: Унив. кн., 2011. С. 71–74.

LITHOLOGICAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE AREA OF FLUID DISCHARGE IN THE KARA SEA

© 2025 E. A. Moroz^{a, #}, E. A. Eremenko^{a, b}, A. V. Ermakov^a, A. P. Denisova^a,
A. V. Drazdova^a, R. A. Ananiev^c, V. V. Arkhipov^d, S. V. Maznev^e

Presented by Academician of the RAS K.E. Degt'yarev April 23, 2025

^a*Geological Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia*

^c*Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^d*N.N. Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

^e*Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

[#]*E-mail: morozzea@gmail.com*

The paper presents the results of lithological and geochemical analysis of marine sediments collected in the southwestern part of the Kara shelf in the area of development of gas-saturated deposits in a paleovalley at a depth of 112 m. It has been established that the accumulation of sediments occurred under conditions of seabed fluid flow as a result of degradation of permafrost and destruction of gas hydrates contained in it, which are apparently suppliers of isotopically heavy waters to the studied strata.

Keywords: seabed fluid flow, gas flares, seismoacoustics, gas hydrates, water isotope composition, granulometric analysis, permafrost