

УДК 551. 435

ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЕ КОНТУРИТОВЫЕ ДРИФТЫ НА ШЕЛЬФЕ КАРСКОГО МОРЯ

© 2023 г. Б. В. Баранов^{1,*}, А. К. Амбросимов¹, Е. А. Мороз², А. Д. Мутовкин¹,
Е. А. Сухих², К. А. Дозорова¹

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 24.03.2023 г.

Поступило 24.03.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принято к публикации 14.04.2023 г.

Анализ батиметрических и сейсмоакустических данных, полученных в 41-м и 49-м рейсах НИС “Академик Николай Страхов” (2019 и 2020 г.), дал возможность впервые выявить на шельфе юго-западной части Карского моря контуритовые дрифты, приуроченные к узкой субмеридиональной депрессии глубиной до 240 м. Дрифты отделены от подстилающих осадков базальным несогласием, которое маркирует возникновение придонного течения в морской среде после таяния Баренцево-Карского щита в позднеплейстоцен-голоценовое время. Гидрологические измерения, выполненные в рейсе 89 (этап 1) НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2022 г.), показали наличие придонного течения, измеренная скорость которого достигает 10 см/с.

Ключевые слова: Арктика, Карское море, морфология рельефа, строение осадочного чехла, контуритовые дрифты, придонные течения

DOI: 10.31857/S2686739723600595, EDN: WFYMIW

ВВЕДЕНИЕ

Контуритовые дрифты образуются в результате аккумуляции осадочного материала, переносимого придонными (контурными) течениями. На морском дне эти осадочные тела отчетливо выделяются по своей приуроченности к определенным структурным элементам дна, морфологии, строению, особенностям осадконакопления и встречаются в различных обстановках среды, значительно варьируя по своим размерам и мощностям [1–4].

Контуритовые дрифты известны во многих районах Мирового океана [3, 5], но в Карском море эти образования были впервые обнаружены при анализе батиметрических и сейсмоакустических данных, полученных в 41-ом и 49-ом рейсах НИС “Академик Николай Страхов” в 2019 и 2020 г. [6, 7]. Дополнительная информация о возможном наличии этих осадочных тел на шельфе Карского моря была собрана в рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш”, проведенных в рамках программы Института океанологии РАН “Экосистемы морей Сибирской Арктики” [8].

Штатная судовая гидроакустическая система картирования морского дна фирмы RESON (Дания) использовалась для сбора батиметрических данных в рейсах НИС “Академик Николай Страхов”. Многолучевая батиметрическая съемка производилась на мелководном эхолоте Reason SeaBat 8111 с рабочей частотой 100 кГц и полосой охвата до 150°. В комплекс также входил высокочастотный профилограф EdgeTech 3300 (США) с частотой 2–12 кГц.

Сейсмическая съемка проводилась с использованием непрерывного сейсмического профилирования (НСП) на аппаратуре “Геонт-шельф”.

В качестве излучателя использовался спаркер $W = 600$ Дж, приемником являлась сейсмокося, длиной 25 м. Буксировка забортных устройств НСП осуществлялась на глубине не более 1 м. Период запуска сейсмического источника был равен 1 с.

Для исследования течений в рейсе 89 (этап 1) НИС “Академик Мстислав Келдыш” [9] использовались инклинометрические измерители скорости придонных течений (ИСПТ), разработанные и изготовленные в ИО РАН [10]. Эти измерители позволяют исследовать временную изменчивость и пространственную структуру течений в тонком придонном слое, где большинство традиционных измерителей течений не позволяют получать адекватные данные [11]. Перед рейсом калибров-

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширинова
Российской академии наук, Москва, Россия

² Геологический институт РАН, Москва, Россия

*E-mail: bbaranov@ocean.ru

ка каждого прибора проводилась в специализированном бассейне лаборатории геоэкологии Атлантического отделения ИО РАН.

В данной работе на базе полученных данных дается описание выделенных контуритовых дрифтов, включая их структурное положение, морфологию, особенности строения. Дрифты отделяются от подстилающей осадочной толщи базальным несогласием, маркирующим позднеплейстоцен-голоценовое время возникновения придонного течения, скорость которого достигает 10 см/с.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Карское море расположено на пассивной континентальной окраине, и его юго-западная часть состоит из трех морфоструктурных элементов, включающих в себя Новоземельскую впадину, Западно-Карскую ступень и Ямало-Гыданскую отмель. Полигон, на котором проводились детальные исследования и были обнаружены контуритовые дрифты, находится на Западно-Карской ступени (рис. 1, правая верхняя врезка). Рельеф полигона представляет собой эрозионно-денудационную равнину, расположенную на глубине около 60 м, переработанную водно-ледниковыми и криогенными процессами с последующей морской аккумуляцией. В пределах полигона наиболее яркой формой рельефа является линейная депрессия субмеридионального простирания длиной 18 км, глубиной до 240 м и шириной от 1.5 до 3 км (рис. 1). Поперечный профиль депрессии имеет корытообразную форму (рис. 1, левая нижняя врезка, рис. 2, профили 3–5), углы наклона склонов в среднем равны 15–20°, а на наиболее крутых участках достигают 27–30° [7, 12].

Дно депрессии является наклонным и сейсмоакустические данные свидетельствуют, что наклон обусловлен наличием осадочного тела в основании западного склона депрессии. Это осадочное тело по геометрии и амплитудным характеристикам отражающих горизонтов можно подразделить на две сейсмические единицы, разделенные базальным несогласием. Нижняя сейсмическая единица заполняет дно депрессии и состоит из горизонтально-слоистых отражений, в верхней единице отражающие горизонты наклонены и перекрывают нижнюю с подошвенным прилеганием (рис. 2, профиль 3).

На дне депрессии на двух участках появляется вал, который различим на батиметрической карте полигона, цифровой модели депрессии, батиметрических и сейсмоакустических профилях (рис. 1, нижние врезки, рис. 2, профили 4 и 5). Высота вала колеблется от нескольких метров на юге депрессии до 20 м на севере, вал имеет асимметричный профиль и ограничен с обеих сторон рвами.

В северной части депрессии вал протягивается на расстояние около 3.5 км, имея ширину до 700 м, для южной части эти значения равны 5 км и 700 м соответственно.

Две сейсмические единицы, разделенные базальным несогласием, можно выделить в осадочном чехле и на профилях, пересекающих валы в северной и южной частях депрессии (рис. 2, профили 4 и 5). Нижняя единица представлена слоистой осадочной толщей с параллельными отражающими горизонтами, залегающей горизонтально или слегка прогнутой в центральной части депрессии. Верхняя сейсмическая единица также является слоистой, но имеет линзовидную форму, обусловленную выгибанием вверх отдельных отражающих горизонтов, что приводит к формированию на дне вала и миграции одного из рвов вверх по склону (рис. 2, профили 4 и 5).

Приведенные выше особенности строения осадочного тела, расположенного в депрессии, являются диагностическими критериями, по которым выделяются контуритовые отложения [1, 2]. Эти критерии включают в себя: 1 – базальное несогласие, которое прослеживается через весь дрифт и маркирует время возникновения придонного течения; 2 – линзовидные, выгнутые вверх отражающие горизонты, наличие которых приводит к появлению валов в рельефе и миграции контуритового рва (*moat*, англ.) вверх по склону; 3 – изменения геометрии и амплитуды отражающих границ в теле контуритового дрифта, связанные с изменением количества переносимого материала и скорости придонного течения.

Параметры придонного течения в южной части депрессии на глубине 123 м были измерены в рейсе 89 (этап 1) НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2022 г.) с помощью двух инклинометров, установленных на притопленной буйковой станции (ПБС) № 7442А (рис. 1). Инклинометры располагались в 30 см от дна на расстоянии 10 м друг от друга.

Наблюдения, которые проводились в течение четырех суток, показали почти полную идентичность записей обоих приборов (рис. 3). Средние значения придонных скоростей переноса составили около 3 см/с, максимальные значения достигали 10 см/с. На скорость и направление течения значительное влияние оказывают полусуточные приливные волны (рис. 3 б, г), а на асимметрию записей – постоянная составляющая течения в ССВ-направлении (рис. 3 а, в). Суммарный перенос водных масс относительно датчика № 37 составил 17 821 м, а географический – 10 229 м в СВ- или ССВ-направлении, для датчика № 38 эти значения были равны 15 398 и 8992 м соответственно.

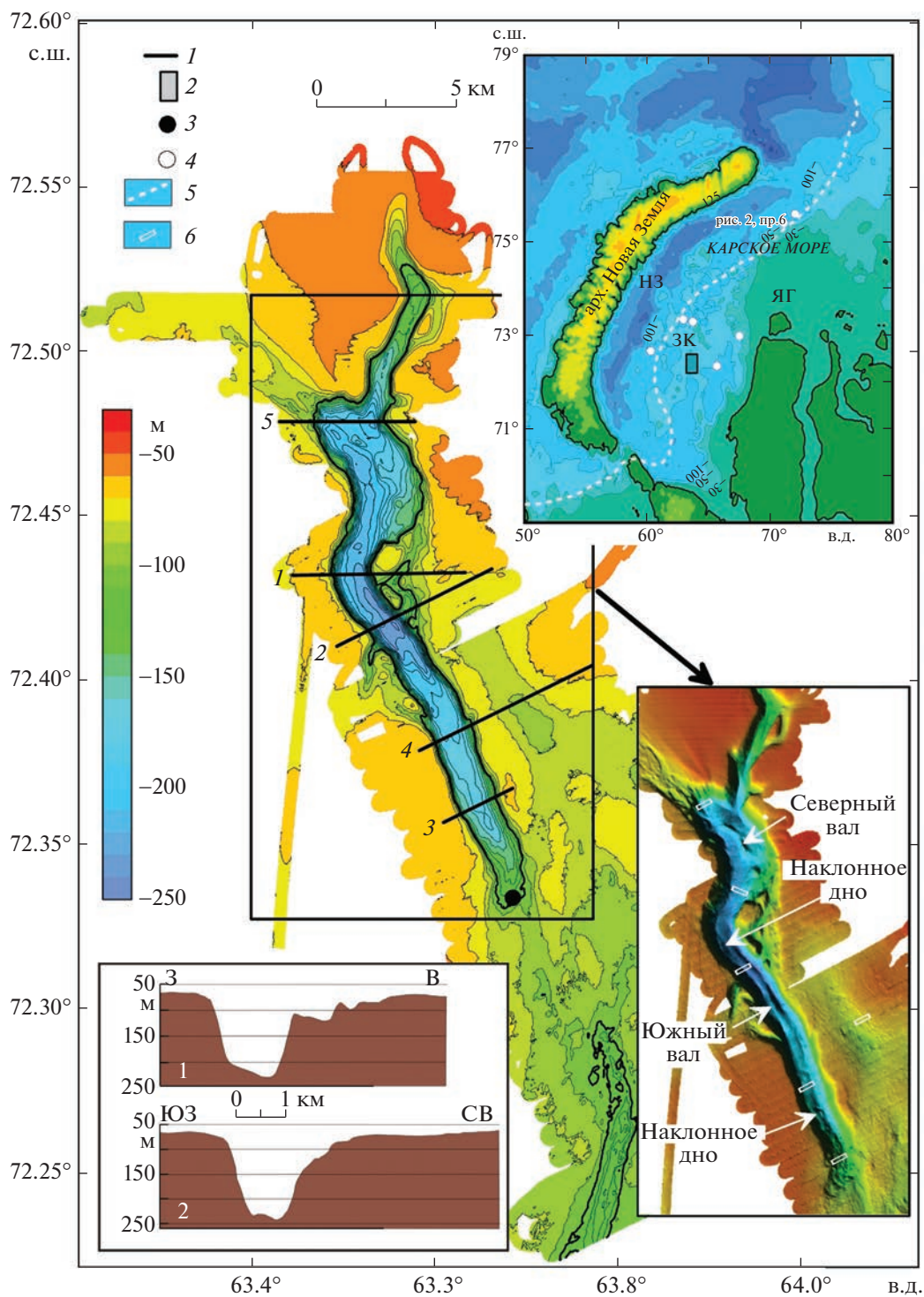


Рис. 1. Батиметрическая карта полигона в юго-западной части Карского моря [7, 12], его местоположение (правая верхняя врезка) и цифровая модель центральной части полигона (правая нижняя врезка). На левой нижней врезке показаны батиметрические профили, пересекающие депрессию. Изобаты проведены через 10 м, жирная линия – изобата 100 м. Условные обозначения: 1 – батиметрические и сейсмоакустические профили, 2 – полигон, 3 – притопленная буйковая станция № 7442А, 4 – предполагаемые контуритовые дрефты, 5 – восточная граница Баренцево-Карского ледникового щита на время ПЛМ [13], 6 – границы между наклонным дном и валами. Сокращения: НЗ – Новоземельская впадина, ЗК – Западно-Карская ступень, ЯГ – Ямало-Гыданская отмель.

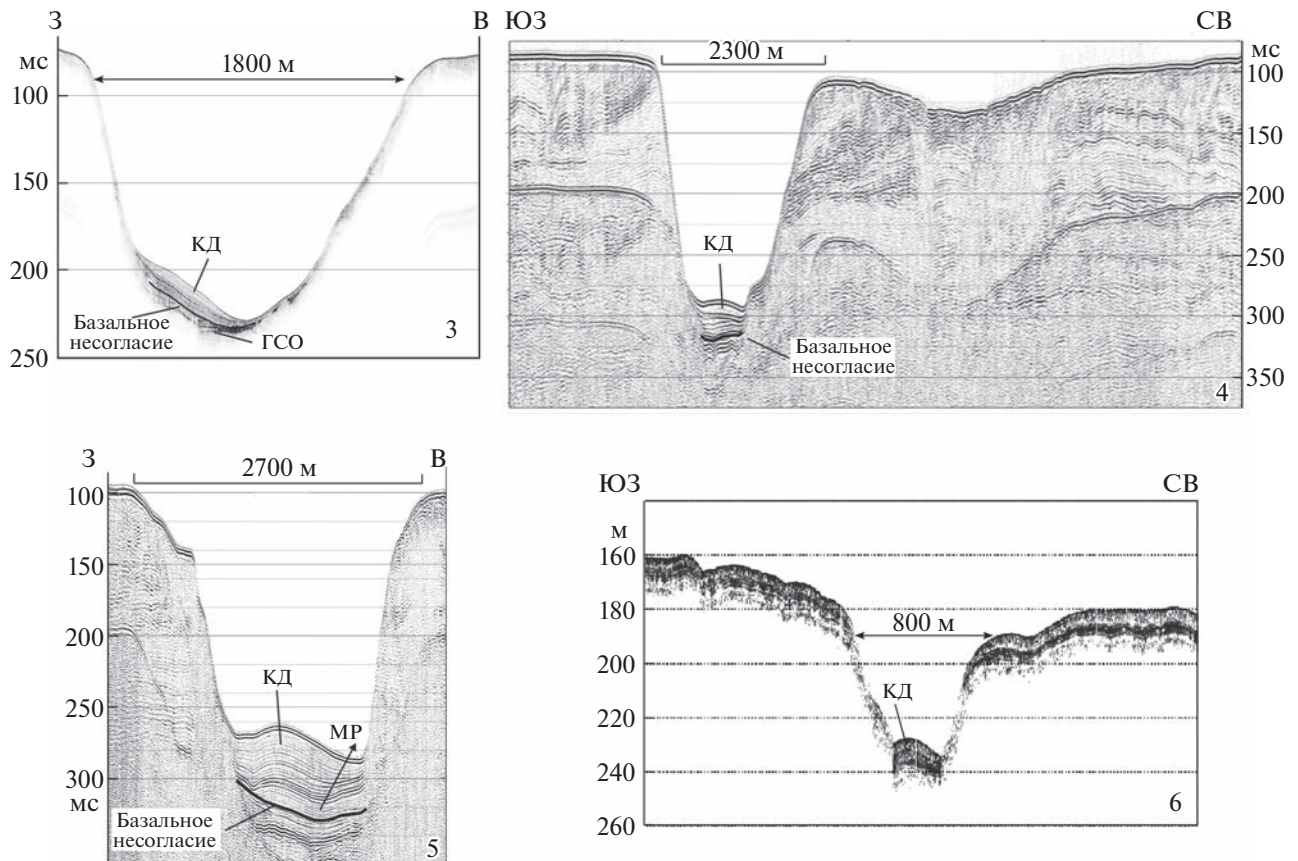


Рис. 2. Фрагменты сейсмоакустических разрезов, иллюстрирующие строение осадочного чехла на дне двух депрессий: профиль 3 получен с использованием профилографа; профили 4 и 5 – с использованием метода непрерывного сейсмического профилирования, излучатель спаркер [7, с нашей интерпретацией]; профиль 6 – эхолот EA600 с частотой 12 кГц (83-й рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”, 2021 г.). Вертикальные оси для профилей 3–5 – удвоенное время пробега волны в миллисекундах. Сокращения: КД – контуритовый дрефт, МР – мигрирующий контуритовый ров, ГСО – горизонтально-слоистые отражения. Положение профилей 3–5 показано на рис. 1, профили 6 – на рис. 1, правая верхняя врезка.

ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенного анализа на шельфе в центральной части Западно-Карской ступени по морфологии рельефа и строению осадочного чехла были выделены контуритовые дрефты. Они расположены на дне замкнутой депрессии, глубина которой не превышает 240 м, имеют большую мощность (до 40 м) и, в соответствии с классификацией из работы [3], являются мелководными ограниченными (*confined*, англ.) контуритовыми дрефтами, образовавшимися в результате деятельности придонных течений.

Время возникновения придонных течений в исследуемом районе фиксируется базальным несогласием, возраст которого неизвестен. В связи с этим для оценки возраста базального несогласия и, следовательно, времени начала формирования контуритовых отложений в результате возникновения морской среды и придонных течений, воспользуемся общими представлениями о палео-

географии этого региона во время последнего ледникового максимума (ПЛМ).

Баренцево-Карский щит в сартанское время (МИС 2) перекрывал Новоземельскую впадину и во время максимальной стадии своего развития край ледника был приурочен к положению современной изобаты 100 м на юго-восточном склоне впадины [14] и находился западнее полигона исследований (рис. 1, правая верхняя врезка). В это время уровень моря был ниже на 130 м относительно своего современного положения [15] и на шельфе Карского моря существовали перигляциальные условия.

Затопление шельфа Карского моря в ходе постгляциальной трансгрессии происходило в три этапа – 18, 11 и 9 тыс. лет назад, во время которых береговая линия находилась на современных изобатах 100, 50 и 30 м соответственно [16]. Минимальные глубины полигона равны 50 м, а максимальные – 240 м, поэтому есть основания предполагать, что полное затопление этого района

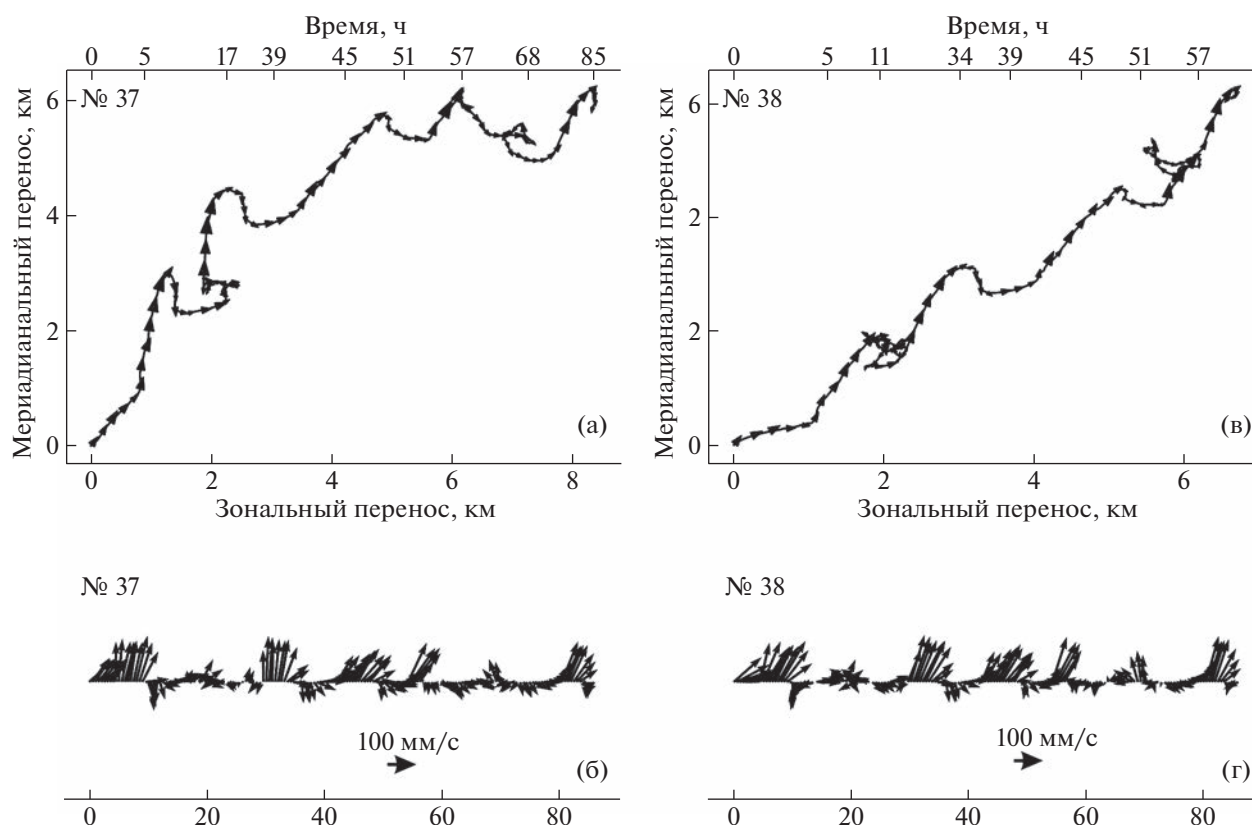


Рис. 3. Придонный перенос водных масс на ст. 7442А по данным инклинометров № 37 и № 38: (а, в) – прогрессивно-векторные диаграммы течений; (б, г) – изменчивость скорости и направления течения во времени (стрелки показывают географическое направление течения, длина стрелки – модуль скорости).

произошло в интервале времени 18–9 тыс. лет назад. Возникновение морских условий привело к появлению придонных течений и связанных с ними контуритовых дрейфов. На сейсмических разрезах толща контуритовых дрейфов сохраняет свои особенности до поверхности дна, что свидетельствует о наличии придонного течения в этом районе в настоящее время.

Выполненные нами измерения параметров этого течения в депрессии показали, что оно направлено на северо-восток, имеет полусуточные колебания скорости от 0 до 10 см/с и является приливным течением. Средняя скорость течения равна 3 см/с, что близко к значению 2.2 см/с, определяемому в качестве средней скорости для контуритовых дрейфов [5]. Небольшие колебательные значения скорости течения с переходом через ноль у дна являются оптимальными условиями для осаждения взвешенного материала из придонного нефелоидного слоя.

Приливные течения представляют собой один из четырех типов течений, которые могут формировать контуритовые тела [4]. В нашем случае приливное течение, вероятно, является основным компонентом системы течений Карского

моря, поскольку в силу своей природы оно возникает и сохраняет стабильность с момента появления морского бассейна.

В пределах Западно-Карской ступени широко распространены линейные депрессии, простирающиеся в субмеридиональном направлении и аналогичные структуре, на дне которой, как было показано выше, располагаются контуритовые дрейфы. Эти депрессии рассматриваются в качестве современных грабенов проседания, образовавшихся в результате тектонического крипа земной коры при ее билатеральном растяжении [17]. Специальных исследований осадочного чехла в пределах этих структур не проводилось. Однако на батиметрических профилях, полученных в рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” по программе Института океанологии РАН “Экосистемы морей Сибирской Арктики”, на дне депрессий выделяются валы высотой до 25–30 м. Конфигурация отражающих горизонтов на разрезе имеет линзовидную, выгнутую вверх форму (рис 2, профиль б), что дает основание предполагать контуритовое происхождение этих валов.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований в Арктическом регионе впервые обнаружены мелководные (<300 м) контуритовые дрифты. Они заполняют узкую депрессию длиной 18 км и глубиной до 240 м, находящуюся на шельфе юго-западной части Карского моря. Базальное несогласие между горизонтально залегающими отложениями и контуритовыми осадками маркирует позднеплейстоцен-голоценовое время возникновения придонных течений, сформировавшихся в результате восстановления морской среды после таяния Баренцево-Карского щита в этом регионе.

Исследованная депрессия является одной из множества аналогичных структур на шельфе Карского моря, в которых могут находиться контуритовые дрифты. В совокупности они, вероятно, составляют систему дрифтов, возникновение которых обуславливается деятельностью приливных течений в условиях узких глубоких депрессий. Дальнейшее комплексное изучение этой системы даст возможность понять особенности гидродинамических и осадочных процессов, возникающих при формировании циркуляции водных масс в мелководном море, расположенном в арктических широтах. Понимание этих процессов необходимо для решения технологических задач, возникающих при разработке проектов строительства объектов нефтегазодобычи на шельфе Карского моря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Д.Г. Борисову, М.Д. Кравчишиной и Н.О. Сорохтину за обсуждение данной работы, А.О. Коржу и А.А. Кондрашову за помощь в проведении инклинометрических измерений.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института океанологии № FMWE-2021-0004 и Геологического института № FMMG-2023-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Faugères J.C., Stow D.A.V., Imbert P., Viana A.* Seismic features diagnostic of contourite drifts // *Marine Geology*. 1999. V. 162. P. 1–38.
2. *Nielsen T., Knutz P.C., Kuijpers A.* Chapter 16. Seismic expression of contourite depositional systems // *Contourites. Developments in Sedimentology*. Eds. M. Rebesco, A. Camerlengi, B.V. Elsevier, 2008. V. 60. P. 301–321. ISSN 0070-4571. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(08\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(08)00215-X)
3. *Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Rooij D.V., Wählin A.* Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations // *Marine Geology*. 2014. V. 352. P. 111–154. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.011>
4. *Shanmugam G.* Contourites: Physical oceanography, process sedimentology, and petroleum geology // *Petroleum exploration and development*. 2017. V. 44 (2). P. 183–216. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30023-X](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30023-X)
5. *Thrana A.C., Dutkiewicz A., Spence P., Müller R.D.* Controls on the global distribution of contourite drifts: Insights from an eddy-resolving ocean model // *Earth and Planetary Science Letters*. 2018. V. 489. P. 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.02.044>
6. Отчет о работах в 41-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” (25 июня – 9 августа 2019 г.). Москва: ИОРАН, 2019. 156 с.
7. Отчет о работах в 49-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” (18 августа – 7 сентября 2020 г.). Москва: ИОРАН, 2020. 134 с.
8. *Флинт М.В., Поярко С.Г., Римский-Корсаков Н.А., Мирошников А.Ю.* Экосистемы морей сибирской Арктики – 2020 (81-й рейс научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”) // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 2. С. 412–417. / <https://doi.org/10.31857/S0030157421020040>
9. *Кравчишина М.Д., Кловиткин А.А., Новигатский А.Н. и др.* 89-й рейс (1-й этап) научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш”: климатический эксперимент во взаимодействии с самолетом-лабораторией Ту-134 “Оптик” в Карском море // *Океанология*. 2023. V. 63. № 3. С. 1–4. <https://doi.org/10.31857/S0030157423030073>
10. *Пака В.Т., Набатов В.Н., Кондрашов А.А. и др.* Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47. № 2. С. 220–229. [https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47\(2\).13](https://doi.org/10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(2).13)
11. *Крек А.В., Пака В.Т., Крек Е.В. и др.* Комплексные исследования в 44-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Борис Петров” // *Океанология*. 2019. Т. 59. № 5. С. 888–890. <https://doi.org/10.31857/S0030-1574595888-890>
12. *Сорохтин Н.О., Никифоров С.Л., Ананьев Р.А. и др.* Геодинамика арктического шельфа России и рельефообразующие процессы в Центральном-Карском бассейне // *Океанология*. 2022. Т. 62. № 4. С. 625–635. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040116>
13. *Svendsen J.I., Gataullin V., Mangerud J., Polyak L.* The glacial history of the Barents, Kara sea region / In J. Ehlers & P.L. Gibbard (eds.): *Quaternary glaciations—extent and chronology*. Part 1. Europe. 2004. pp. 369–378. Amsterdam: Elsevier
14. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А. и др.* Рельеф дна и строение верхней осадочной толщи западной части шельфа Карского моря в районе формирования нефтегазовых месторождений / *Геология и геолого-разведочные работы // Нефтяное хозяйство*. 2022. № 8. С. 46–50. ISSN 0028-2448.

15. *Lambeck K., Rouby H., Pursell A., et al.* Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene // *Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences*. 2014. V. 111 (43). P. 15296–15303. <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>
16. *Stein R., Macdonald R.W., Naidu A.S., et al.* Organic carbon in Arctic Ocean sediments: sources, variability, burial, and paleoenvironmental significance // *Org. Carbon Cycle Arct. Ocean*. 2004. P. 169–314. https://doi.org/10.1007/978-3-642-18912-8_7
17. *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.

LATE QUATERNARY COUNURITE DRIFTS ON THE KARA SEA SHELF

**B. V. Baranov^{a,#}, A. K. Ambrosimov^a, E. A. Moroz^b, A. D. Mutovkin^a,
E. A. Sukhikh^b, and K. A. Dozorova^a**

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: bbaranov@ocean.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy March 24, 2023

Contourite drifts were for the first time detected on the SW Kara Sea shelf basing on analysis of bathymetry and seismoacoustic data obtained in RV “Akademik Nikolay Strakhov” cruises 41 (2019) and 49 (2020). The drifts are confined to narrow nearly NS-striking depression with depth reaching 240 m. They are separated from underlying sediments by basal unconformity, conditioned by origination of bottom current in marine environment after Barents-Kara shield melting during Late Pleistocene – Holocene. Hydrological measurements performed during Cruise 89–1 of RV “Akademik Mstislav Keldysh” (2022) shows existence of bottom current with measured velocity up to 10 cm/s.

Keywords: Arctic, Kara Sea, relief morphology, sedimentary structure, contourite drifts, bottom currents