

УДК 551.461.8

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ МЕЛКОВОДНОГО КОНТУРИТОВОГО ДРИФТА В КАРСКОМ МОРЕ

©2025 г. С. В. Сломнюк^{1, *}, Б. В. Баранов¹, Е. А. Новичкова¹, Н. В. Козина¹,
К. М. Смирнова¹, К. С. Якимова¹, А. Г. Матуль¹, Е. А. Мороз², М. Д. Кравчишина¹

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

²Геологический институт Российской академии наук, Москва, Россия

* e-mail: slomnyuk.sv@ocean.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

После доработки 02.10.2024 г.

Принята к публикации 03.10.2024 г.

Впервые изучены донные отложения верхней части мелководного контуритового дрифта, расположенного в узкой линейной депрессии, относящейся к центральной части шельфа Карского моря. По гранулометрическому типу отложений дрифт относится к илистым контуритам. В трех колонках донных осадков мощностью до 7 м выделено три основных горизонта в осадконакоплении. Обнаружение в основании разреза отложений ранее датированного в Карском море характерного пика магнитной восприимчивости позволяет отнести начало формирования дрифта к послеледниковому времени с возрастом более 10 тыс. кал. л. н. Судя по находкам толерантных к опреснению видов в комплексах бентосных фораминифер, на местные условия осадконакопления в голоцене влияло неоднократное увеличение речного стока. Увеличение мощности осадочных горизонтов в колонках и отложений дрифта в целом с юга на север косвенно свидетельствует о наличии в голоцене и ранее придонного течения общего субмеридионального направления.

Ключевые слова: Карское море, донные отложения, илистый контуритовый дрифт, голоцен, линейное сканирование осадков, придонные течения

DOI: 10.31857/S0030157425010128, **EDN:** DPGENH

ВВЕДЕНИЕ

Контуритовые дрифты — аккумулятивные осадочные тела, формирующиеся на дне морей и океанов, под воздействием постоянных придонных течений, подробно описаны для многих районов Мирового океана [19, 23, 27]. Известны различные типы контуритовых дрифтов (далее — дрифтов), различающиеся по размерам и объему, мощности отложений, глубине нахождения на дне, приуроченности к различным морфоструктурным элементам дна и гранулометрическим типам осадков [25]. Одним из наименее изученных типов считаются илистые контуритовые дрифты (англ. muddy contourites), осадки которых могут более чем на 50% состоять из пелитового ила с примесью песчаной фракции до 15% и включать до 10% известково-кремнистых скелетных остатков организмов, органическое вещество которых часто замещается гидротроилитовыми включениями в процессе диагенеза [25]. В редких случаях илистые дрифты имеют первичную слоистость по цвету осадков и появлению прослоев плохо

сортированного более крупнозернистого материала [26]. Изучение илистых контуритовых дрифтов в шельфовых арктических морях позволяет реконструировать динамику придонных течений на коротких временных интервалах и при небольших изменениях условий осадконакопления.

Контуритовый дрифт впервые был обнаружен на шельфе Карского моря при анализе батиметрических и сейсмоакустических данных [1] в 41-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2019 г. [12]. Дрифт находится в узкой замкнутой депрессии, расположенной на шельфе Карского моря в пределах Западно-Карской ступени (рис. 1). Она простирается в субмеридиональном направлении, ее длина равна 18 км, ширина колеблется от 1.5 до 3 км, глубина достигает 240 м. Поперечный профиль депрессии имеет корытообразную форму, углы наклона склонов в среднем равны 15–20°, а на наиболее крутых участках достигают 27–30° [16]. Ее дно является наклонным в восточном направлении, и сейсмоакустические данные свидетельствуют, что наклон обусловлен

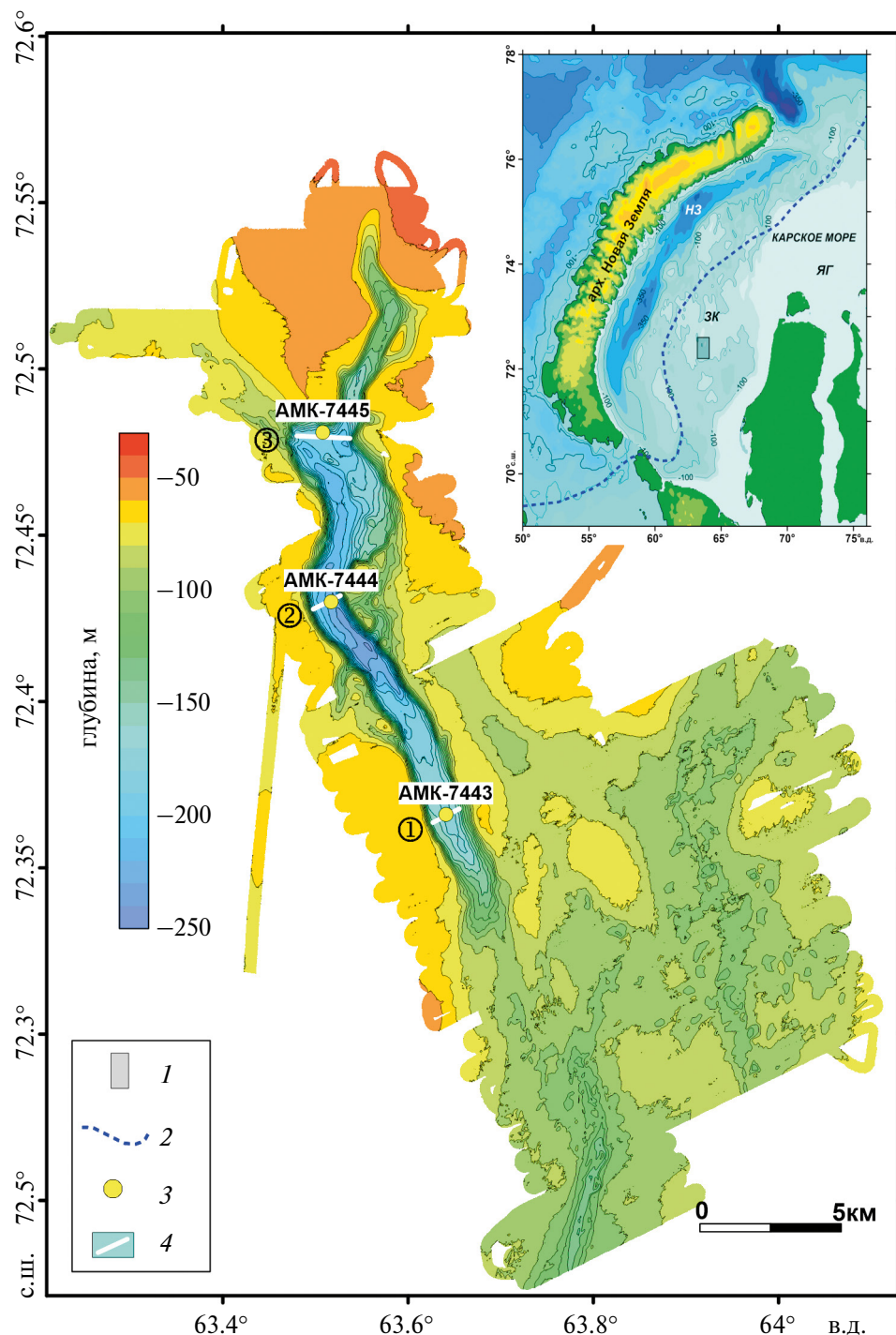


Рис. 1. Батиметрическая карта линейной депрессии в Карском море [13], в которой расположен рассматриваемый контуритовый дрейф: на врезке: 1 – положение депрессии (с использованием карты из работы [11]); 2 – восточная граница Баренцево-Карского ледникового щита во время максимума последнего оледенения по [32]; 3 – станции опробования осадков в 89-м рейсе (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2022 г. и их номера; 4 – положение сейсмоакустических профилей 1–3, показанных на рис. 2.

наличием осадочного тела в основании западного склона депрессии. Это осадочное тело выделяется как верхняя сейсмическая единица с наклонными отражающими горизонтами, залегающими с несогласием на горизонтально-слоистые горизонты

нижней сейсмической единицы. Осадки последней заполняют дно депрессии (рис. 2, профиль 1).

В рельефе дна на двух участках появляется вал высотой до 20 м, который имеет асимметричный профиль и ограничен с обеих сторон рвами.

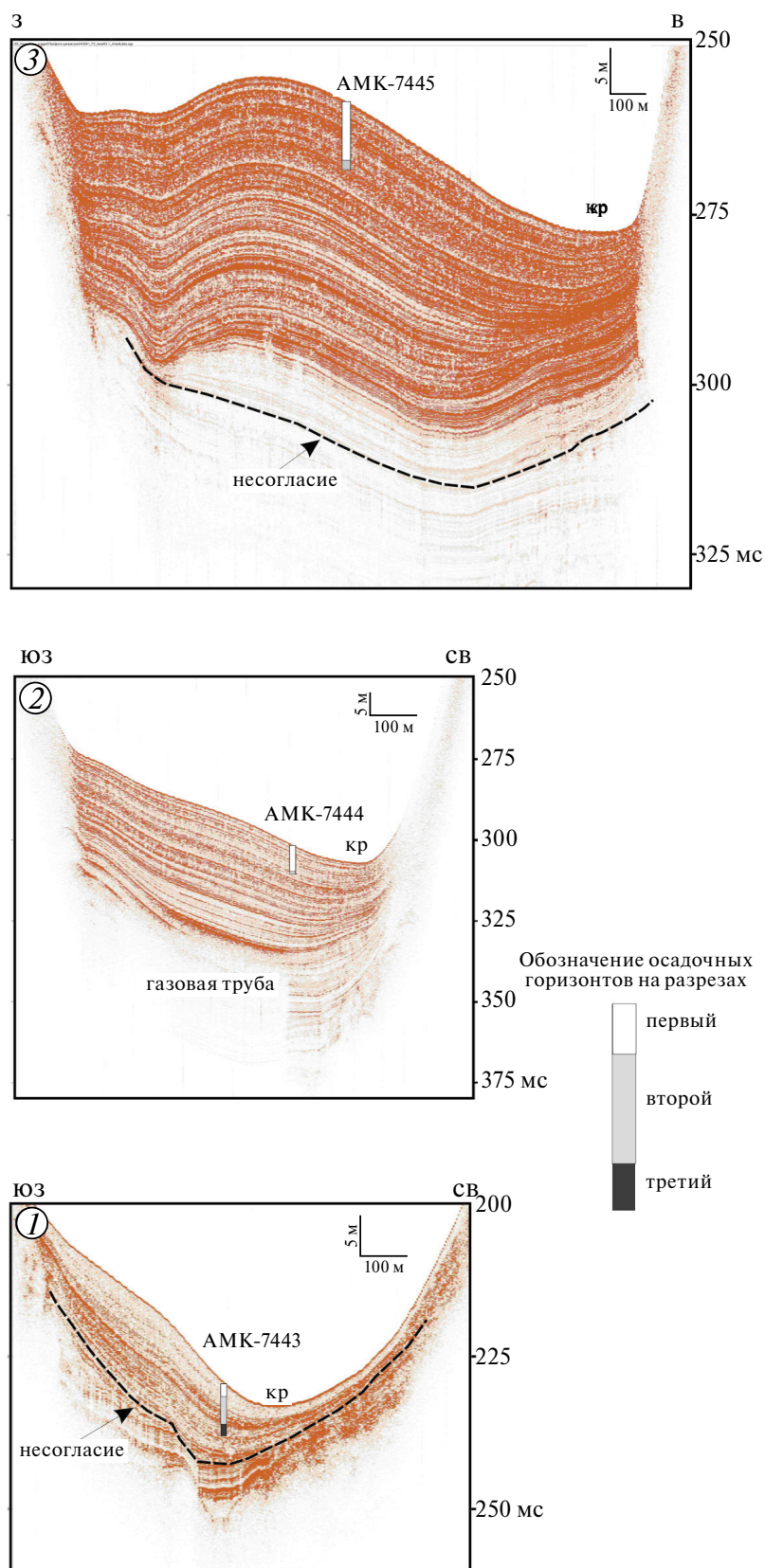


Рис. 2. Фрагменты сейсмоакустических разрезов с указанием места отбора колонок донных осадков. Контуритовый ров (кр) выделяется на основании его особенности мигрировать вверх по восточному склону депрессии. Несогласие разделяет верхнюю и нижнюю сейсмические единицы на разрезах 1 и 3. На разрезе 2 несогласие маскируется газовой трубой. Вертикальная шкала – удвоенное время пробега волны в миллисекундах. Положение разрезов см. на рис. 1.

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 несогласием, также видны в осадочном чехле на профилях, пересекающих валы. Нижняя единица представлена слоистой осадочной толщей с параллельными отражающими горизонтами, залегающими горизонтально или слегка прогнутыми 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 (рис. 2, профиль 3).

Рассмотренные выше структурное положение осадочного заполнения депрессии, особенности его морфологии и строения дают основание интерпретировать его верхнюю сейсмическую единицу согласно классификации из работы [25] в качестве контуритового дрифта ограниченного типа (англ. confined).

В 89-м рейсе (1-й этап) НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2022 г. [8] впервые был опробован исследуемый дрифт трубкой большого диаметра (ТБД) в центральной и дистальных частях осадочного тела (рис. 1). Целью работы было исследование условий формирования контуритового дрифта на шельфе Карского моря. Для этого было проведено литолого-стратиграфическое изучение трех колонок, отобранных в разных частях исследуемого осадочного тела и включающих в себя: 1) анализ литолого-геохимических характеристик осадков; 2) выявление взаимосвязей между основными цветовыми характеристиками осадка и его магнитной восприимчивостью (МВ), а также выделение и корреляция отдельных горизонтов в отобранных колонках; 3) определение типа контуритового дрифта согласно принятой в литературе классификации [19].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Колонки АМК-7443, АМК-7444 и АМК-7445 отобраны с помощью геологической трубки большого диаметра (ТБД, наружный диаметр 127 мм) в южной, центральной и северной частях осадоч-

ного тела соответственно (рис. 1, таблица). Длина колонок достигала 7 м. Для корреляции осадочных и отражающих горизонтов опробование проводилось по данным трех сейсмоакустических профилей, полученных с помощью высокочастотного профилографа EdgeTech 3300 (США) с частотой 2–12 кГц в 41-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2019 г. в рамках программы комплексных геолого-геофизических и геоморфологических исследований ИО РАН на шельфе Баренцева и Карского морей (рис. 2) [12].

Макроскопическое литологическое описание осадков было выполнено на борту судна согласно методике [10]. Определение цвета осадка проводилось по каталогу цвета почв Munsell color soil chart [22]. Каждая колонка на борту судна была поделена вдоль оси на архивную и рабочую части. Архивные части трех колонок донных осадков фотографировали и после этого сразу герметично упаковывали на борту судна, а затем были изучены в лаборатории ИО РАН с помощью автоматизированной системы комплексного сканирования кернов Geotek MSCL–XYZ (Великобритания). Эта система оснащена точечным датчиком магнитной восприимчивости MS3 Bartington Instruments (Великобритания), спектрофотометром CM-2300d Konica Minolta (Япония) и рентгенофлуоресцентным (РФА) датчиком Geotek XRF (15 Вт/50 кВ, Rh-анод) с гелиевой камерой (15 × 10 мм, время 1 с) и настройками трубок 10 кВ (70 мкА) и 40 кВ (95 мкА, с Ag-фильтром 125 мкм) [23]. Сканирование кернов позволило получить данные по МВ осадков (MS) в единицах SI, характеристикам отраженного света (светлота L^*) и интенсивности цвета (a^* и b^*) и по геохимии (элементный состав) методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с дискретностью 10 мм. Спектральные данные рентгенофлуоресцентного анализа обработаны с помощью программного обеспечения bAxiI, а результаты представлены в виде соотношений сигналов от элементов (количество отсчетов в секунду) и/или нормализованных значений сигналов для отдельного элемента. Для минимизации влияния влажности осадков пиковые области элементных профилей нормализованы на общий

Таблица. Расположение изученных колонок донных осадков

№ Колонки	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м	Длина колонки, см
АМК-7443	72°21.970'	63°38.463'	177	670
АМК-7444	72°25.823'	63°31.000'	228	619
АМК-7445	72°28.839'	63°30.484'	193	784

разброс, который включает некогерентное и когерентное рассеяние [21].

Рабочие части колонок разделены на пробы с шагом 1 см. На борту судна проведен экспресс-анализ общего содержания и видового состава (%) раковин бентосных фораминифер (БФ) в осадках колонок с частотой отбора каждые 10 см. Осадок промывался через сито 63 мкм и просматривался под биноклем Zeiss Stemi 508 (Германия) при увеличении 25×.

Гранулометрический анализ осадков выполнен для центральной колонки профиля АМК-7444. Анализ проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SHIMADZU SALD2300 (Япония) в отдельных пробах через каждые 20 см по всей длине колонки. Определение общего ($C_{\text{общ}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода выполнялся с помощью автоматического кулонометрического анализатора АН 7529 (Белоруссия) в осадках двух колонок (АМК-7443 и АМК-7444) через каждые 10 см (аналитик Попова М.А.). Расчет содержания карбоната кальция (весовые%) выполнен по формуле $\text{CaCO}_3 = (C_{\text{общ}} - C_{\text{орг}}) \times 8.3$, исходя из стехиометрических коэффициентов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В колонке АМК-7443 из южной части дрефта осадки представлены алевропелитовыми илами темно-серых (5Y/4/1) и зеленовато-серых (5Y/4/1, Glay 1/3/10Y) оттенков с разным содержанием песка и примазок гидротроилита. На глубине 540–670 см отмечены прослой и линзы темно-серого (5Y/4/1) песка мощностью до 5 см, частота которых увеличивается к забою колонки. Верхняя граница слоя на уровне 508–540 см очень четкая и представлена прослоем пелитового песка темного-серого цвета. Выше песчаного прослоя на глубине 185–508 см залегает алевритово-песчаный пелитовый ил преимущественно темно-серого цвета (5Y/3/1) с частыми гидротроилитовыми стяжениями и примазками, количество которых уменьшается выше 217 см. В средней части колонки (глубина 376–387 см) отмечены прослой и линзы песка. Верхний интервал (глубина 2–185 см) сложен алевритово-пелитовым илом темного серого цвета (5Y/4/1) с гидротроилитовыми примазками и стяжениями. Его главное отличие от нижележащих прослоев — многочисленные включения обломков раковин двустворчатых моллюсков.

Известно, что изменение значений МВ осадков напрямую зависит от содержания фер-

ромагнитных минералов (преимущественно терригенного происхождения), в то время как диagenетические процессы способствуют перераспределению железа с образованием сульфидных минералов с более низкой МВ [20]. В колонке АМК-7443 МВ изменяется в широком диапазоне от 10 до 177×10^{-5} SI. Максимальные значения отмечены в интервале 540–670 см, а в верхних интервалах (0–170, 170–540 см) МВ не превышает $10\text{--}40 \times 10^{-5}$ SI.

Не менее важным признаком изменения литологического состава осадков считается распределение его светлоты (L^*). Ее величина зависит в большей степени от содержания карбонатных частиц в составе осадков, и в меньшей — от присутствия светлоокрашенных или прозрачных минералов (например, кварца) [17]. В колонке АМК-7443 она значительно изменяется от 20 до 44 единиц, но в интервале 170–540 см остается в пределах 20–27 единиц.

Для оценки роли поставки грубозернистого материала на шельф Карского моря в колонке АМК-7443 использовано соотношение Si/Al, которое изменяется в зависимости от доли абиогенного кварца, содержащегося в песчаной фракции, и алюмосиликатов [18]. Отношение Si/Al изменяется в колонке от 7 до 22 с максимумом в интервале 540–690 см, а выше горизонта 540 см значения Si/Al не превышают 13.

При анализе фораминифер планктонные виды не обнаружены, а бентосные фораминиферы встречаются только в интервале 0–540 см и представлены 22 видами. В интервале 170–540 см в ассоциациях БФ преобладают виды *Cassidulina reniforme*, *Elphidium clavatum* и *Nonion labradoricum*. *C. reniforme* — типичный арктический вид, связанный с холодными и солеными арктическими водами и с характерным для ледниково-морских обстановок типом осадконакопления [7]. Вид-оппортунист *E. clavatum*, который в Арктике встречается практически повсеместно, часто достигает высокой численности в стрессовых обстановках с ярко выраженной сезонностью поступления питательных веществ во время опреснения при таянии льдов. *N. labradoricum* — вид, распространенный в арктических морях в зоне с чрезвычайно высокой сезонной продуктивностью, считается индикатором близкой границы сезонных льдов [7]. Кроме того, *C. reniforme* и *N. labradoricum* являются типичными представителями сообщества среднего шельфа (river-intermediate) для Карского моря по классификации Л. Поляка и соавторов [24]. В интервале 0–170 см ассоциации БФ представлены

видами *Cibicides lobatulus*, *Islandiella norcrossi*, *E. incertum*, *Haynesina orbiculare*, *Buccella frigida*, *E. bartletti*. *C. lobatulus* характерен для активной гидродинамической обстановки [7]. *I. norcrossi* маркирует арктические условия с высокой сезонной продуктивностью. В целом, *C. lobatulus*, *I. norcrossi* вместе с *Melonis barleeanus* относятся к видам, характеризующим сообщество дальнего шельфа (river-distal), удаленного от влияния речных вод [23]. Сообщество видов *E. incertum*, *H. orbiculare*, *B. frigida*, *E. bartletti* относится к типичным арктическим, устойчивым к понижению солености (до 25 епс). В Карском море они формируют сообщество ближнего шельфа (river-proximal), находящегося под сильным влиянием речного стока [23].

Осадки колонки АМК-7444 из центральной части дрифта представлены однородным пелитовым илом темно-серого цвета (5Y/4/1), уплотняющимся к забою. В осадках отмечены многочисленные зерна вивианита [5].

Значения МВ осадков изменяются от 12 до 25×10^{-5} SI. Ее максимумы отмечены в интервале 575–619 см, а выше она изменяется от 12 до 18×10^{-5} SI. Значения светлоты осадка L^* в колонке АМК-7444 составляют от 19 до 40 единиц. Они максимальны от 32 до 40 единиц в интервале 0–200 см, а минимальны от 20 до 30 единиц в интервале от 200 до 575 см. Резкое повышение значений L^* также отмечено в слое 575–619 см.

По результатам гранулометрического анализа осадка, колонка АМК-7444 сложена пелитовым илом с содержанием пелита до 98%. Важно отметить, что в нижней части колонки в интервале 575–619 см присутствуют 3% частиц песчаной размерности, которые не были установлены для вышележащих горизонтов. Таким образом, визуальное описание осадка не выявило сильных различий литологического состава, однако по результатам сканирования керна и по данным гранулометрического анализа был выделен горизонт 575–619 см. Показатель грубозернистости осадка Si/Al изменяется в пределах колонки от 8 до 10. Среднее распределение этого соотношения составляет 9 единиц.

Состав БФ в колонке АМК-7444 представлен 23 видами и мало отличается от такового в колонке АМК-7443. Планктонные виды фораминифер в осадках тоже отсутствуют, в то время как БФ обнаружены по всему разрезу. В интервале 510–611 см БФ представлены видами *E. clavatum* и *C. reniforme*. Выше по колонке в интервале 230–510 см состав БФ обогащается видами *I. norcrossi*, *N. labradoricum*, *E. incertum*, *B. frigida*, *E. bartletti*.

Для верхнего интервала 0–230 см характерны виды *E. clavatum*, *B. frigida*, *E. bartletti*.

Осадки колонки АМК-7445 из северной части дрифта представлены алевропелитовым илом темно-серого (5Y/4/1), насыщенно темно-серого (5Y/2.5/1) и черного (5Y/2.5/1, Glau 1/2/5/N) цветов с разным содержанием гидротроилита. На глубине 685–784 см отмечены более плотные прослои алевропелитового ила размером до 2 мм, частота которых увеличивается к забою. В вышележащем горизонте 28–685 см отмечены прослои пелитового ила с примесью песчаной фракции на глубинах 648–652 и 654–656 см. Верхний горизонт колонки 0–28 см отличается от нижележащих темно-коричневым (7.5YR/3/2) цветом и более интенсивной биотурбацией.

Значения МВ в колонке АМК-7445 изменяются от 10 до 31×10^{-5} SI. Максимальные величины МВ от 20 до 31×10^{-5} SI отмечены в интервале 0–685 см, а ниже по разрезу они составляют от 15 до 20×10^{-5} SI. Показатели светлоты L^* изменяются от 17 до 40. Важно отметить, что ниже глубины 685 см идет резкое (от 35 до 40 единиц) повышение значений L^* . Показатель грубозернистости осадка Si/Al изменяется в пределах колонки от 7 до 11, а его пиковые значения встречены в интервале 0–100 см.

Ассоциации БФ представлены 16 видами, а планктонные виды фораминифер не обнаружены. БФ постоянно встречаются в интервале 0–540 см и единичные находки отмечены на глубинах 730 и 770 см. В интервале 180–540 см характерны виды *I. norcrossi*, *E. clavatum*, *N. labradoricum*, *C. reniforme*. В интервале 80–160 см ассоциации БФ представлены видами *I. norcrossi*, *E. clavatum*, *N. labradoricum*, *E. incertum*, *B. frigida*, *E. bartletti*. Более бедный состав БФ (*E. clavatum*, *C. reniforme* и *E. incertum*) найден в верхнем интервале 0–80 см.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление литологического описания осадков колонок и данных спектрофотометрии и магнитометрии, геохимических параметров и распределения БФ позволило выделить три основных литолого-стратиграфических горизонта в колонке АМК-7443 и два — в колонках АМК-7444 и 7445 (рис. 4). Осадки нижнего горизонта (горизонт III) вскрыты только в южной части дрифта (колонка АМК-7443) на глубине 691–540 см (рисунки 3 и 4а). Они представлены пелитовым илом темно-серого цвета, чередующегося с прослоями песка, мощностью до 5 см,

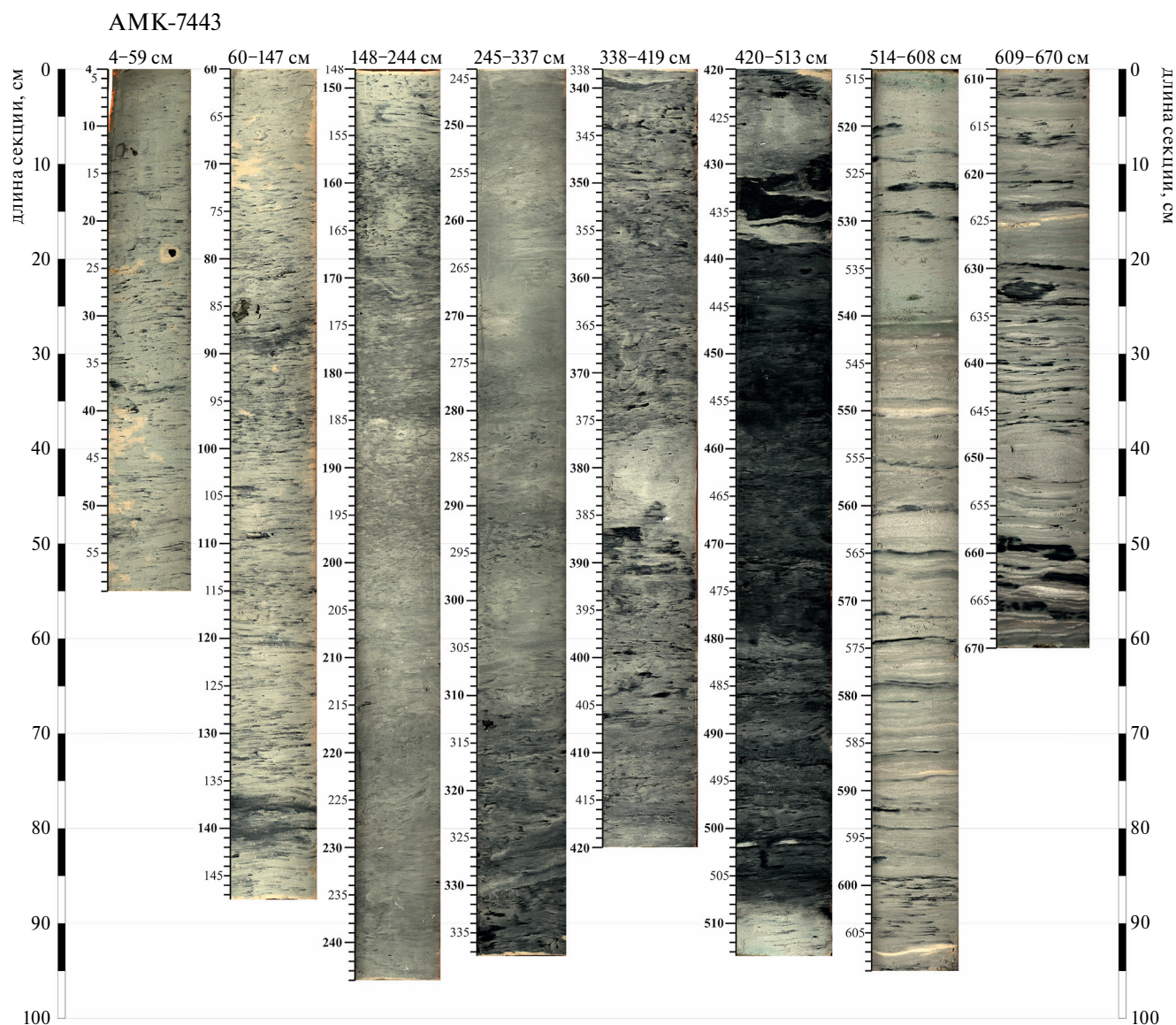


Рис. 3. Фотографии секций колонки донных осадков ст. АМК-7443, полученные при съемке линейной камерой системы комплексного сканирования кернов MSCL–XYZ GEOTEK.

и алевритового ила — 5 до 30 см. Здесь отмечены повышенные значения MB , L^* и Si/Al . В них очень мало органического вещества и отсутствуют фораминиферы. На сейсмоакустическом профиле, к которому приурочена колонка АМК-7443, выделяется высокоамплитудный рефлекс, который прослеживается через все осадочное тело и соответствует кровле горизонта III на глубине 540 см (рис. 2, разрез 1). Вероятно, это связано с выносом крупнозернистого терригенного материала, что подтверждается повышенными значениями MB и Si/Al . Однако колонка АМК-7443 не достигла несогласия, которое по сейсмоакустическим данным находится на глубине 10.5 м от дна.

Средний горизонт (горизонт II), вскры-

тый в колонках АМК-7443 (540–170 см), 7444 (от низа до 575 см), 7445 (от низа до 685 см), сложен плотным алевритопелитовым илом с прослоями песка и алеврита с песчаной примесью в южной части дрифта. На сейсмоакустических разрезах 2 и 3 границы между первым и вторым горизонтами соответствуют отчетливым рефлексам, однако ниже и выше их значения записи существенно не меняются (рис. 2), что свидетельствует о схожем литологическом составе осадков. В южной части дрифта (колонка АМК-7443) литологическая граница между вторым и третьим горизонтами представлена мощным прослоем серого песка и соответствует высоко амплитудной отражающей границе

на сейсмоакустическом профиле (рис. 2, разрез 1). По сравнению с нижним горизонтом III, для осадков этого горизонта характерно уменьшение значений MB, Si/Al и L*. Светлота осадка уменьшается за счет увеличения содержания гидротроилита. Начиная со второго горизонта, осадочная толща средней и северной частей дрефта сложена преимущественно пелитовыми илами. Для данного горизонта характерно увеличение доли органического вещества (ОВ) до 0.7% в составе осадков, которые содержат обломки створок двустворчатых моллюсков и стяжения гидротроилита. В составе комплексов БФ встречаются вид-индикатор стрессовых обстановок *E. clavatum*, а также виды, типичные для обстановок среднего шельфа, *N. labradoricum* и *C. reniforme*. Согласно экологии видов можно предположить повышенную продуктивность вод на данном этапе формирования осадков дрефта как вследствие активности придонных течений, так и близкого положения сезонной границы льдов. Влияние пресных вод во время накопления горизонта II подтверждается видами-индикаторами опресненных обстановок ближнего шельфа *E. incertum*, *B. frigida* и *E. bartletti*. В составе комплексов БФ преобладают представители среднего шельфа. По данным экспресс-анализа осадки II горизонта накапливались в остановках, характерных для суровых условий арктического морского бассейна со значимым притоком пресных вод [7, 15, 24].

Осадки верхнего горизонта (**горизонт I**) в колонках АМК-7443 (170–0 см), АМК-7444 (575–0 см) и АМК-7445 (685–0 см) представлены мягким однородным алевроитопелитовым илом оливкового цвета без включений карбонатного материала. Граница между горизонтами I и II не выражена, переход постепенный; слои осадков выделяются по возрастанию содержанию C_{org} и увеличению стяжений гидротроилита. Для них характерны пониженные значения MB и Si/Al и L*. Виды *C. reniforme*, *E. incertum* и *C. lobatulus* представляют сообщества как дальнего, так и среднего (преобладающее), и ближнего шельфа. Смешанный тип сообществ БФ может свидетельствовать об активной гидродинамической обстановке внутри изучаемой депрессии. Кроме того, перенос мелководных БФ сообщества ближнего шельфа может также осуществляться с морским льдом, как показано в [6, 15, 24].

Рассматриваемый контуритовый дрефт в основном сложен тонкозернистым материалом. В южной его части (колонка АМК-7443) установлена хорошо выраженная литологическая грани-

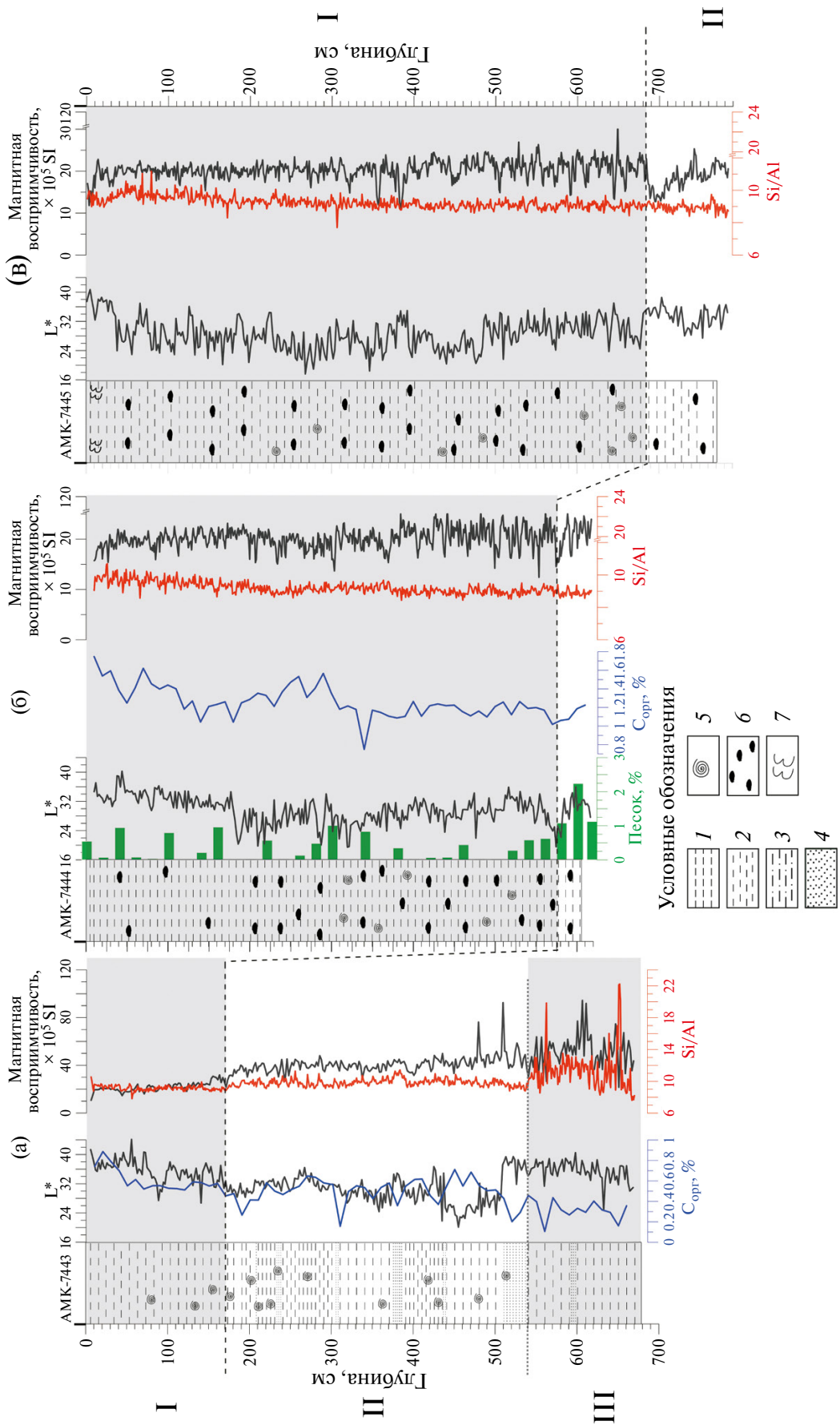
ца на глубине 540–510 см, ниже которой вскрыты более грубозернистые отложения (горизонт III, рис. 3). Эта граница хорошо выражена в донных осадках по всей площади Карского моря и предположительно характеризует переход от ледниково-морского типа осадконакопления к морскому по данным [28] около 10 тыс. кал. л. н.

Осадки горизонтов I и II на сейсмоакустических профилях имеют хорошо выраженную слоистость (рис. 2), а их состав характерен для илистого контуритового дрефта [31]. Механизмы образования отложений такого типа до сих пор еще слабо изучены [31]. В арктических морях к ближайшим аналогам рассматриваемого осадочного тела относится высокоширотный дрефт Квейтола, расположенный в одноименном трое западной континентальной окраины Баренцева моря [31]. Механизм формирования этого дрефта хорошо описан в цитируемой работе. Однако, интенсивность придонных течений в Карском море на порядок ниже, чем на западной континентальной окраине Баренцева моря [1], а материал, слагающий дрефт, более тонкозернистый, что затрудняет его изучение.

Согласно [25], осадки “классического” илистого контуритового дрефта имеют признаки сильной биотурбации и первичной ламинации (lamination). По литологическому составу, структуре и условиям образования контуритовый дрефт Карского моря более схож с контуритовым дрефтом Балтийского моря [27]. В [27] отмечается, что структура горизонтов мелководного илистого контуритового дрефта существенно отличается от классической контуритовой последовательности горизонтов тем, что ламинация присутствует по всей глубине керна, а биотурбация практически отсутствует.

Данные анализа фораминифер, спектрофотометрии и магнитометрии показывают вероятную неоднократную смену обстановок осадконакопления во время формирования дрефта. Выявленное пилообразное распределение L* и MB вряд ли может быть объяснено исключительно воздействием придонных течений [1]. Характерная для илистых контуритов тонкослоистая текстура осадков четко видна при съемке высокоразрешающей линейной камерой (рис. 3) и так же присутствует на сейсмоакустических профилях в южной части дрефта, в то время как для его центральной и северной частей отмечено отсутствие слоистости из-за более тонкозернистой структуры осадка (рис. 2).

В пределах Западно-Карской ступени широко распространены депрессии (рис. 5а), аналогичные структуре, рассматриваемой в данной



работе [11]. Они вытянуты в субмеридиональном направлении и интерпретируются в качестве современных грабенов проседания, образовавшихся в результате тектонического крипа земной коры при ее билатеральном растяжении [2]. Наличие на шельфе Карского моря таких депрессий, схожих с рассматриваемой, дает основание предположить возможность формирования в этих структурах контуритовых дрифтов, аналогично тому, как это происходит в рассмотренной нами.

Депрессия, вмещающая осадки рассматриваемого дрифта, располагается восточнее границы распространения Баренцево-Карского ледникового щита во время максимума последнего четвертичного оледенения (26–20 тыс. кал. л. н.), которая маркируется положением многочисленных конечных моренных гряд, приуроченных к современной изобате 100 м в Карском море (рис. 1) [14]. Струи основных течений приурочены к перепаду глубин в пределах 50- и 100-метровой изобат [4], которые в свою очередь контролируют перенос взвеси в центральную часть срединного шельфа Карского моря [9]. В этой области шельфа формируется гидрологический фронт, разделяющий различные водные массы [4], способствующий

осаждению взвешенного осадочного вещества и, в конечном итоге, образующий отложения контуритового дрифта.

По данным прямых инклинометрических измерений северное направление придонного течения в депрессии сохраняется в настоящее время [1]. Измерения, проведенные в течение 4-х суток, выявили приливные течения СВ и СВВ направлений, средние значения скоростей которых вблизи дна составили 3 см/с, а максимальные скорости достигали 10 см/с [1]. Полученные данные о направлении течений в исследованном районе соответствуют измерениям, выполненным в течение года в юго-западной части Карского моря [3].

Аридный климат краевой приледниковой зоны привел к формированию рыхлого осадочного чехла, легко размываемого реками во время деградации ледникового щита около 19 тыс. л. н. и способствующего в дальнейшем накоплению тонкозернистого материала на дне современного морского бассейна [30]. Резкая дегляциация привела к повышению уровня Мирового океана суммарно на 120 м, и шельф Карского моря был затоплен в три этапа (18, 11 и 9 тыс. кал. л. н.),

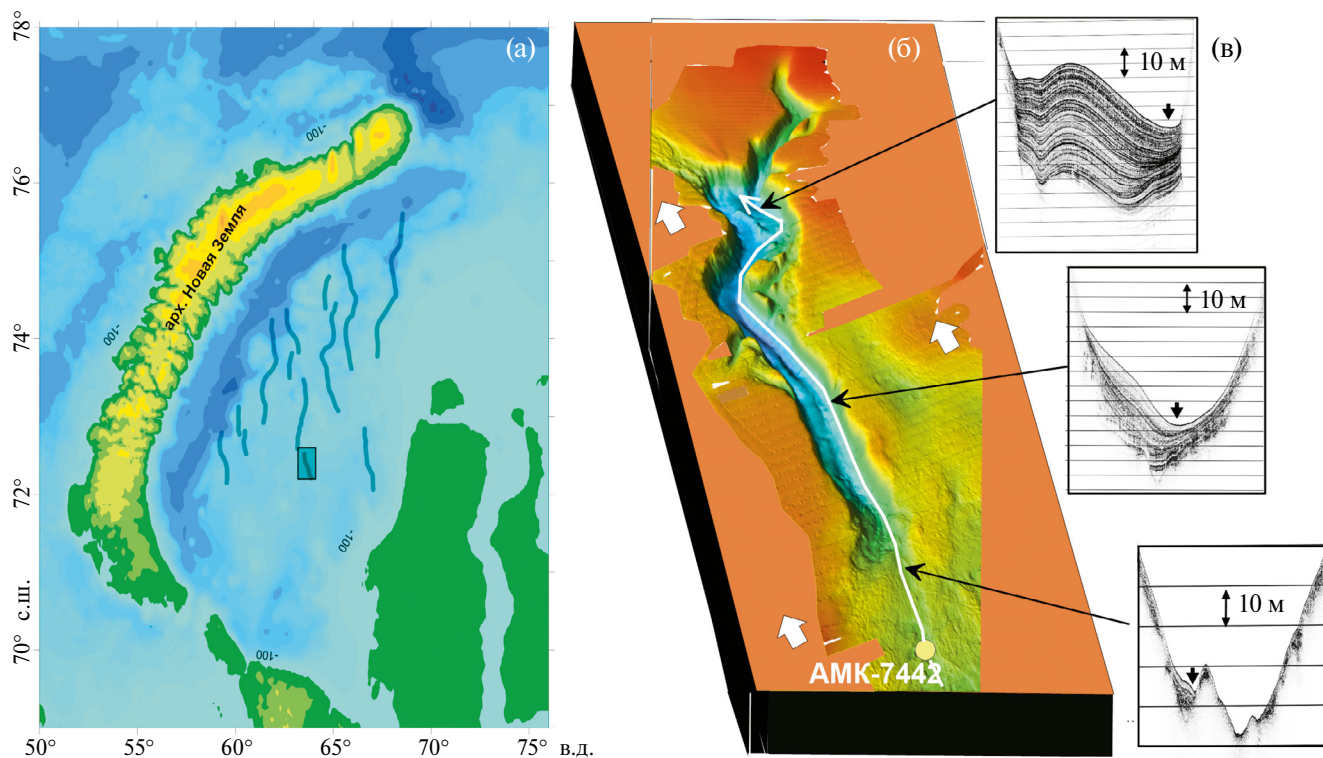


Рис. 5. Схема расположения депрессий в Карском море, составленная по карте [11] с сечением изобат 20 м. Прямоугольником показан район исследования (а), трехмерное изображение района исследований, тонкая белая линия со стрелкой обозначает сфокусированный водный поток в депрессии, приуроченный к контуритовому рву, толстые стрелки – придонные течения на шельфе, пронумерованный залитый кружок маркирует точку измерения направления и скорости придонного течения (б), сейсмоакустические профили, показывающие увеличение мощности контуритового дрифта с юга на север. Стрелками обозначен контуритовый ров (в).

во время которых береговая линия соответствовала современным изобатам 100, 50 и 30 м соответственно [29]. Установившееся после 9 тыс. кал. л. н. нормальное морское осадконакопление привело к тому, что приледниковые формы рельефа были сглажены и частично размыты под воздействием течений и волн.

ВЫВОДЫ

Впервые изучен литологический состав отложений мелководного илистого контуритового дрефта из Карского моря и обсуждается механизм его формирования. Показано, что осадки третьего горизонта (вблизи подошвы дрефта) накапливались в ледниково-морских условиях арктического бассейна со значительным поступлением грубозернистого материала, о чем свидетельствуют высокие значения магнитной восприимчивости и отношения Si/Al. Характерный для Карского моря переход от ледниково-морского к морскому типам осадконакопления отмечен около 10 тыс. кал. л. н. [28] по резкому снижению показателей грубозернистости, увеличению доли ОВ в составе осадков, уменьшению L^* вследствие образования гидротроилита и появлению раковин БФ. Для второго горизонта реконструируются морские условия осадконакопления с поступлением пресноводного речного стока и возможным ростом сезонной биологической продуктивности. Осадки первого горизонта формировались в нормальных морских условиях, близких к современной обстановке осадкообразования и поступлением материала из областей внутреннего шельфа.

Согласно данным магнитной восприимчивости возраст контуритового дрефта и соответственно возраст устойчивого придонного течения составляет более 10 тыс. к. л. Увеличение мощности первого горизонта в колонках в северном направлении позволяет судить о длительном переносе осадочного материала, т.е. о стационарном направлении течения, по крайней мере, с начала голоцена. Перенос осадочного материала в северных румбах в течение более продолжительного периода времени подтверждается увеличением мощности отложений дрефта на северном замыкании депрессии по сравнению с ее южным окончанием. Этот процесс происходил за счет сфокусированного потока придонного течения, приуроченного к контуритовому рву.

Исследование аккумулятивных осадочных тел типа контуритовых дрефтов или осадочных волн можно использовать для реконструкции придонных течений [33]. Комплексное изучение конту-

ритовых дрефтов дает информацию об особенностях гидродинамических и осадочных процессов, возникающих и существующих при формировании системы придонных течений, особенно в молодых мелководных бассейнах арктического региона.

Благодарности. Авторы благодарят экипаж НИС “Академик Мстислав Келдыш”, а также всех участников экспедиции за помощь при опробовании осадков грунтовыми трубками. Так же авторы выражают свою благодарность Е.А. Овсепян за консультацию по БФ. Авторы искренне благодарят рецензента, чьи комментарии и замечания значительно улучшили данную статью.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0020 — отбор осадков, литологические исследования) и гранта РНФ № 24-17-00044, <https://rscf.ru/project/24-17-00044> (микрорепалеонтологический и гранулометрический анализ осадков).

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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. № 2. С. 102–108.
2. Верба М.Л. Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазонасности // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. № 2. С. 1–37.
3. Гудошникова Ю.П., Нестеров А.В., Рожков В.А. и др. Изменчивость течений Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 3. С. 241–249.
4. Зацепин А.Г., Морозов Е.Г., Пака В.Т. и др. Циркуляция вод в юго-западной части Карского моря в сентябре 2007 г. // Океанология. 2010. Т. 50. № 5. С. 683–697.
5. Козина Н.В., Рейхард Л.Е., Кравчишина М.Д. и др. Первая находка вивианита в донных отложениях Карского моря // Океанология. 2024. Т. 64. № 4. / Kozina N.V., Reykhard L. Ye., Kravchishina M.D. et al. First Finding of Vivianite in Kara Sea Bottom Sediments // Oceanology. 2024. V. 64(4). P. 576–583.
6. Корсун С.А. Ледовый разнос — возможный способ расселения литоральных фораминифер // Новейшие отложения и палеогеография северных морей. Апатиты: КФ АН СССР, 1989. С. 100–103.
7. Корсун С.А., Погодина И.А., Тарасов Г.А. и др. Фораминиферы Баренцева моря (гидробиология

- и четвертичная палеоэкология) // Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1994. С. 140.
8. Кравчишина М.Д., Ключиткин 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. Т. 63. № 3. С. 492–495.
 9. Кравчишина М.Д., Леин А.Ю., Суханова И.Н. и др. Генезис и пространственное распределение концентрации взвеси в Карском море в период наибольшего сокращения арктической ледовой шапки // Океанология. 2015. Т. 55. № 4. С. 687–708.
 10. Лисицын А.П., Петелин В.П. К методике предварительной обработки проб морских осадков в судовых условиях // Труды Института океанологии. 1956. Т. XIX. С. 240–251.
 11. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Репкина Т.Ю. и др. Рельеф дна Карского моря и сорбционные свойства осадков как факторы аккумуляции загрязнений // Океанология. 2021. Т. 61. № 5. С. 809–821.
 12. Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н. и др. Геолого-геофизические исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-ом рейсе научно-исследовательского судна “Академик Николай Страхов” в 2019 г. // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 295–296.
 13. Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Ананьев Р.А. и др. Комплексные исследования в морях западной Арктики в 49-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2020 году // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 439–441.
 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. С. 2–6.
 15. Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Баух Х.А. и др. Реконструкция событий позднего плейстоцена–голоцена на континентальном склоне моря Лаптевых по комплексам бентосных и планктонных фораминифер // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 96–112.
 16. 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.
 17. Balsam W.L., Deaton B.C., Damuth J.E. Evaluating lightness as a proxy for carbonate content in marine sediment cores // Marine Geology. 1999. V. 161. P. 141–153.
 18. Calvert S.E., Pedersen T.F. Chapter Fourteen Elemental Proxies for Palaeoclimatic and Palaeoceanographic Variability in Marine Sediments: Interpretation and Application. // Developments in Marine Geology. 2007. V. 1. P. 567–644.
 19. Contourites // Developments in Sedimentology / Rebesco M., Camerlengi A. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2008. V. 60.
 20. Johnson J.E., Phillips S.C., Clyde W.C. et al. Isolating detrital and diagenetic signals in magnetic susceptibility records from methane-bearing marine sediments // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2021. № 22. P. 21.
 21. Kylander M.E., Ampel L., Wohlfarth B. et al. High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies // J. Quat. Science. 2011. V. 26. P. 109–117.
 22. Munsell Soil Color Chart Munsell Soil-Color Charts with Genuine Munsell® Color Chips 2009, Revised 2012 (Munsell Color, Grand Rapids, MI, 2012).
 23. Murdmaa I., Ivanova E., Borisov D. General Methods // The Ioffe Drift / Murdmaa I., Ivanova E. (eds.). Springer, 2021. P. 31–35.
 24. Polyak L., Korsun S., Febo L. et al. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced Arctic marine environment // J. Foram. Res. 2002. V. 32. P. 252–273.
 25. Rebesco M., Hernández-Molina F.J., Rooij D.V. et al. 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.
 26. Rebesco M., Özmaral A., Urgeles R. et al. Evolution of a high-latitude sediment drift inside a glacially-carved trough based on high-resolution seismic stratigraphy (Kveithola, NW Barents Sea) // Quaternary Science Reviews. 2016. V. 147. P. 178–193.
 27. Sivkov V., Gorbtskiy V., Kuleshov A., Zhurov Y. Muddy contourites in the Baltic Sea: an example of a shallow-water contourite system / Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics / Stow D.A.V., Pudsey C.J., Howe J.A. et al. (Eds.). London, Memoirs: Geological Society. 2002. V. 22. P. 121–136.
 28. 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. P. 87–104.
 29. Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (palaeo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1485–1511.
 30. Stein R., Macdonald R.W., Naidu A.S. et al. Organic carbon in Arctic Ocean sediments: sources, variability, burial, and paleoenvironmental significance // Organic Carbon Cycle Arctic. Ocean. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004. P. 169–314.
 31. Stow D.A.V., Faugères J.-C. Contourite facies and the

- facies model // *Contourites* / Rebesco M., Camerlenghi A. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2008. V. 60. P. 223–256.
32. *Svendsen J.I., Gataullin V., Mangerud J. et al.* The glacial history of the Barents, Kara sea region // *Quaternary glaciations – extent and chronology. Part 1. Europe* / Ehlers J., Gibbard P.L. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 369–378.
33. *Wynn R.B., Masson D.G.* Chapter 15: Sediment Waves and Bedforms // *Contourites* / Rebesco M., Camerlenghi A. (eds.). Amsterdam: Elsevier, 2008. V. 60. P. 289–300.

THE SHALLOW-WATER CONTOURITE DRIFT FORMATION IN THE KARA SEA

**S. V. Slomnyuk^{a, *}, B. V. Baranov^a, E. A. Novichkova^a, N. V. Kozina^a, K. M. Smirnova^a,
K. S. Iakimova^a, A. G. Matul^a, E. A. Moroz^b, M. D. Kravchishina^a**

^a *Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

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

* *e-mail: slomnyuk.sv@ocean.ru*

The bottom sediments of the upper part of the contourite drift located in a narrow linear depression belonging to the central part of the Kara Sea shelf were studied for the first time. According to the grain size distribution of the sediments, the drift belongs to the muddy contourites. Three main horizons of sedimentation were identified in three sediment cores up to 7 m long. The previously dated magnetic susceptibility peak at the base of the sediment cores indicates that the formation of the drift began in the postglacial period, more than 10 kyr ago. Local sedimentation conditions during the Holocene were influenced by repeated increases in river discharge, as indicated by the presence of desalination-tolerant species in the benthic foraminiferal assemblages. The increase in thickness of sediment core layers and drift deposits in general from south to north indirectly indicates the presence of a general submeridional trend in the Holocene and earlier bottom current.

Keywords: Kara Sea, sediments cores, muddy contourite drift, Holocene, liner core-scanning, bottom currents