

УДК 551.352

ЛИТОДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО АТЛАНТИЧЕСКОГО СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКОГО ГЛУБОКОВОДНОГО КАНАЛА

© 2019 г. Л. Д. Баширова^{1*}, Е. В. Дорохова¹, В. В. Сивков^{1, 2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

*e-mail: bas_leila@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2019 г.

После доработки 30.11.2019 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

В колонке донных осадков АМК-4474, отобранной в северной части восточного (левого) прируслового вала Северо-Западного атлантического срединно-океанического глубоководного канала, выделено две пачки осадков. Нижняя пачка представлена позднечетвертичными тонкозернистыми осадками верхних турбидитных последовательностей. Существование моды 17–24 мкм в гранулометрических распределениях в тонких силтовых прослоях нижней пачки может отражать сходный с контурными течениями процесс сортировки осадочного вещества периферийными частями турбидитных течений, выходящими за пределы канала и имеющими низкую скорость, т. н. «переливов» (“spillover”). Это позволяет использовать гранулометрический показатель скорости контурных течений SS (sortable silt) для оценки относительной интенсивности «переливов». Верхняя пачка, сформировавшаяся приблизительно в течение последних 26 тыс. лет, представлена пелагическими осадками. Наличие прослоя тонкозернистых осадков в верхней пачке обусловлено, по-видимому, уменьшением поставки IRD в район исследования.

Ключевые слова: Северо-Западный атлантический срединно-океанический глубоководный канал, турбидиты, палеореконструкция, Северная Атлантика

DOI: 10.31857/S0030-1574595803-809

ВВЕДЕНИЕ

Турбидитные течения играют важную роль в транспорте обломочного материала от континентальных окраин к глубинным океанским бассейнам. Они эродировывают океанское дно и формируют огромные подводные каналы. Механизм формирования и развития таких каналов очень сложен. Глубоководные подводные каналы, примыкающие к ним прирусловые валы и отложения конусов выноса, сформированные турбидитными течениями, являются самыми крупными эрозионно-аккумулятивными системами на Земле [7]. До сих пор нет четкого понимания, каким образом развиваются эти каналы. В этой связи изучение истории их формирования и развития является актуальной задачей.

Эрозионно-аккумулятивные системы (канал-дрифт) формируются также геострофическими контурными течениями. Каналы, сформированные контурными течениями, могут быть похожи на каналы турбидитного происхожде-

ния, в частности, наличием прирусловых валов. Вместе с тем под воздействием контурных течений формируются каналы с более выраженной асимметрией поперечных профилей, которые отличаются от турбидитных аналогов распределением песка в канале, а также характером латеральной миграции [4]. Асимметричность поперечных профилей каналов объясняется в значительной степени действием силы Кориолиса, которая обуславливает существование контурных течений [13], более медленных по сравнению с турбидитными.

Северо-Западный атлантический срединно-океанический глубоководный канал является наиболее сложной и значимой современной системой подводных каналов в высоких широтах и играет важную роль в транспорте терригенных осадков в составе турбидитных потоков к глубинным бассейнам северо-западной Атлантики: Лабрадорскому и Ньюфаундлендскому, а также абиссальной равнине Сом [9].

Канал имеет слабовыраженную извилистость и асимметричную структуру в поперечном разрезе, которая обусловлена в том числе действием силы Кориолиса: правый прирусловой вал на 90 м выше и в среднем на 5–10 км шире, чем левый (относительно движения турбидитного потока по каналу с северо-запада на юго-восток) [7, 9]. Активная эрозия должна наблюдаться у правого (западного) прируслового вала с отложением основного объема осадочного материала с левой стороны потока, т.е. на восточном прирусловом вале. Такая асимметрия указывает на заметную роль геострофических течений в формировании канала и распределении прилегающих осадков [7].

Известно, что в настоящее время, как и в периоды межледниковий, скорости осадконакопления в канале довольно низкие. В то же время интенсивная поставка осадочного материала ледникового происхождения отмечена во время похолоданий, когда уровень океана снижался [11].

Цель данной работы — реконструировать литодинамические условия формирования восточного прируслового вала в северной части

Северо-Западного атлантического срединно-океанического глубоководного канала во время плейстоцен-голоценового перехода.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Материалом для исследования послужила колонка донных осадков АМК-4474 ($57^{\circ}51,86''$ с.ш., $51^{\circ}17,34''$ з.д., глубина моря 3565 м, длина колонки 318 м), отобранная с помощью ударной трубки большого диаметра в 48-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2002 г.) на прирусловом вале Северо-Западного атлантического срединно-океанического глубоководного канала (рис. 1). Колонка была опробована на борту судна непрерывно с шагом 2 см. Большая часть колонки (48–316 см) сложена мягким липким илом серого цвета с локальными уплотнениями. Часть из них представлена горизонтальными прослоями (гор. 126–127, 183–184, 197–198, 281–283, 291–292, 294–295, 301–302 и 307–308 см), другая — хаотично расположенными стяжениями округлой или продолговатой формы (размером от 1 до 14 см). Уплотнения пред-

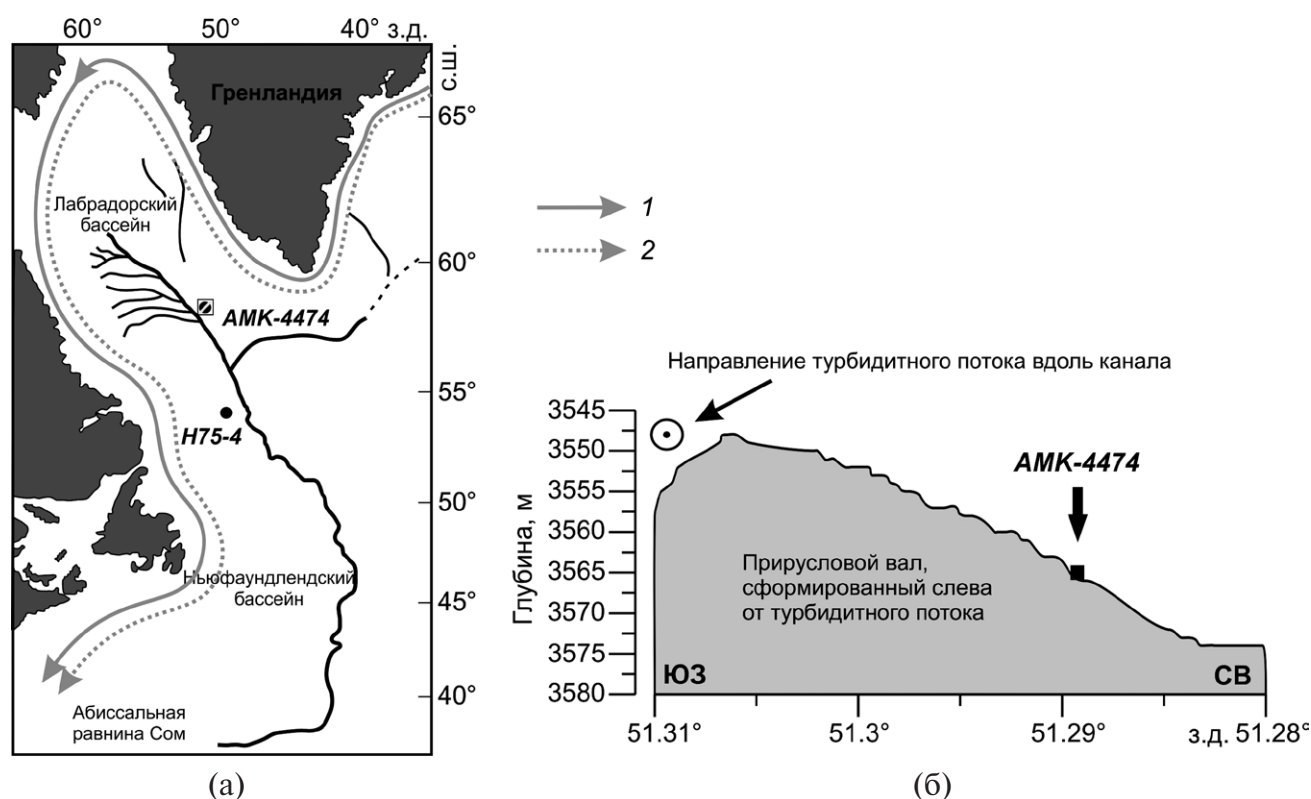


Рис. 1. (а) — Район исследования и местоположение исследуемой колонки донных осадков АМК-4474. Черными линиями показан канал и его рукава (по [9]). Н75-4 — колонка донных осадков, используемая в данной работе для сравнения [9]. (б) — Положение колонки АМК-4474 на субмеридиональном эхолотном профиле, полученном с помощью судового эхолота ELAC-NBS (рабочая частота 12 kHz). 1 — поверхностные течения; 2 — придонные течения.

положительно являются проявлением раннего диагнеза.

На основании литологического описания колонки, результатов гранулометрического анализа валовых проб осадка и содержания карбоната кальция выделены типы осадков. Для этой цели использовался подход Стоу и Пайпера [16]. Классификации осадков проводилась по шкале Вентворса [18], где граница между песками и сiltом установлена на 63 мкм, а между сiltом и глинистым илом — на 4 мкм.

В лаборатории геологии Атлантики АО ИО РАН на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SALD 2300 (Shimadzu, Япония) был выполнен гранулометрический анализ как валовых проб осадков, так и их терригенной составляющей после растворения органического углерода и карбоната кальция перекисью водорода и соляной кислотой. Анализ верхней части колонки (4–48 см) выполнен с шагом 2 см, нижней — каждые 10 см. Дезинтеграция частиц перед анализами производилась с помощью триполифосфата натрия и ультразвуковой ванны. В связи с отсутствием достаточного количества материала анализ терригенной части осадка на горизонтах 0–4 см не был выполнен. Подробная методика описана в [2]. Основные гранулометрические характеристики (средний размер, сортировка) гранулометрических распределений (ГР) рассчитаны в программе GRADISTAT [5].

Дополнительно были получены данные относительного содержания полярного вида планктонных фораминифер *N. pachyderma* (s), карбоната кальция (CaCO_3), а также содержания терригенных зерен (IRD — ice rafted debris) на грамм сухого осадка. Подробно методики описаны в [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследуемая колонка представлена двумя резко отличающимися осадочными пачками с контактом на уровне 48 см. Даже на основании литологического описания колонки видно, что верхняя и нижняя пачки накопились под влиянием разных процессов и в принципиально разных условиях осадконакопления. В верхней пачке (4–48 см) средний диаметр частиц варьирует от 3 до 112 мкм со средним значением 12 мкм (рис. 2г). Коэффициент сортировки также очень изменчив (от 2.8 до 7.7). Нижняя пачка (48–308 см) представлена практически однород-

ным осадком, значения среднего диаметра изменяются в диапазоне от 3 до 12 мкм, коэффициент сортировки — от 2.7 до 3.8.

Нижняя пачка. Во всех пробах нижней пачки (48–316 см) раковины фораминифер встречаются единично и представлены преимущественно видом *N. pachyderma* (s). Содержание IRD также минимально (зерна встречаются единично). Содержание карбоната кальция практически не меняется. Можно предположить, что основную долю карбонатного материала составляют обломки раковин фораминифер и, возможно, кокколиты сiltового размера.

Гранулометрический состав терригенного осадка нижней пачки характеризуется чередованием глинистых илов, имеющих моду 3–4 мкм и пологую функцию ГР, с тонкими прослоями илов с увеличенным содержанием сiltовой фракции и хорошо выраженной модой в 17–24 мкм (рис. 2д). Несмотря на относительно высокое содержание карбоната кальция в нижней пачке (в среднем 47%), после его удаления гранулометрический состав глинистых илов изменился незначительно, тогда как в сiltовых прослоях мода 17–24 мкм стала еще более выраженной.

Выявленная закономерность позволяет предположить, что рассматриваемая пачка сложена тонкозернистыми осадками верхних турбидитных последовательностей (T_d – T_e ; рис. 2д) [6]. Отсутствие нижних, более грубых, прослоев турбидитного цикла обусловлено местом отбора колонки — на прирусловом вале канала. Согласно Хессе с соавторами [9], прирусловые валы канала сложены осадками так называемых «фаций переливов» («spill-over facies»). Они представлены верхними тонкозернистыми частями мутьевого потока, крупнозернистая нижняя часть которого откладывается непосредственно в русле канала и лишь в редких случаях перетекает через его борта. Осадки, представленные верхними турбидитными последовательностями, распространены на расстоянии до 100 км по обе стороны от канала. Их особенностью является монотонное повторение тонкозернистых слоев мощностью 0.2–9.0 см, гомогенных или с градиционной слоистостью. Осадки, сформированные на прирусловых валах «переливами», повсеместно перекрыты или чередуются с пелагическими отложениями различной мощности [9].

Учитывая определенное сходство контуритных и турбидитных систем [7], можно предположить, что в районе отбора колонки верхняя

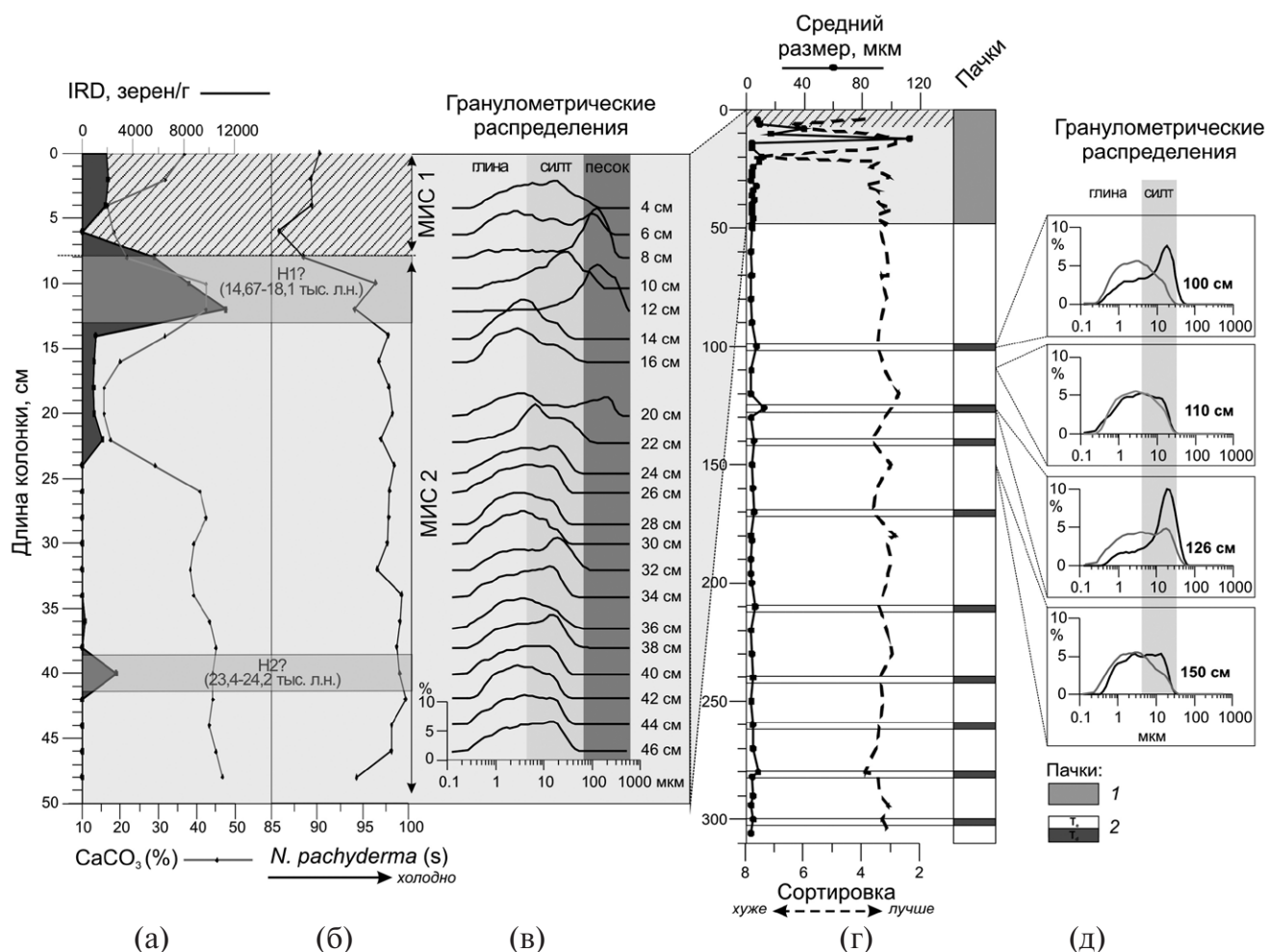


Рис. 2. Литологические характеристики терригенной составляющей колонки АМК-4474: (а) — вклад материала ледового разноса (IRD), а также распределение карбоната кальция в верхней пачке; (б) — распределение полярного вида *N. pachyderma* (s) в верхней пачке; (в) гранулометрические распределения верхней пачки; (г) — средний размер и сортировка терригенной части осадка для всей колонки; (д) — осадочные пачки. 1 — пелагиты, 2 — тонкозернистые турбидиты с последовательностями T_d–T_e и выборочные гранулометрические распределения образцов валового (серые) и терригенного (черные) осадка турбидитной фации.

тонкозернистая часть турбидитного цикла (цикла Боума [6]) накапливается в геострофических условиях, как в контурных течениях. В таком случае возникновение моды 17–24 мкм в ГР в силтовых прослоях может отражать процесс сортировки осадочного вещества. Содержание силтовой фракции может быть аналогом показателя SS (sortable silt), введенного для определения скорости контурных течений [12].

При сравнении нижней пачки колонки АМК-4474 (48–316 см) с нижними пачками изученных ранее колонок, отобранных с прирусловых валов канала [9] и сложенных в основном тонкозернистыми турбидитами, обнаруживается их очевидное сходство (рис. 3). Предполагается, что отсутствие признаков биотурбации в нижней турбидитной пачке колонок, отобран-

ных на прирусловых валах канала, может свидетельствовать о том, что турбидитные последовательности накопились в течение относительно короткого промежутка времени — десятки лет [9]. Эти осадки могли быть сформированы «переливами» одного турбидитного течения, интенсивность которого менялась в течение исследуемого периода.

Верхняя пачка. В верхней пачке (0–48 см) обнаружены достаточно высокие содержания фораминифер и IRD. Предварительные исследования [3] показали, что эта пачка, вероятно, накопилась за последние 24–26 тыс.л.н. Более подробный анализ колонки позволил уточнить относительный возраст осадков верхней пачки и проследить, как менялись гидрологические условия на поверхности океана.

Гранулометрические распределения терригенных осадков верхней пачки колонки АМК-4474 представлены полимодальными кривыми с хорошо выраженными модами: 3–4 мкм, 15–20 мкм и в диапазоне 100–250 мкм. Вклад материала ледового разноса песчаного и крупносилтового размера отражается в увеличении содержания фракции >37 мкм в интервале 6–12 см (рис. 2в). Резкое увеличение содержания зерен IRD на горизонте 8–10 см привело не только к увеличению среднего размера осадка, но и улучшению его сортировки в связи с преобладанием песчаных фракций. Интервал 8–13 см можно отнести к событию Хайнриха 1 (14,67–18,1 тыс.л.н. [14]), выделенному в колонке по результатам подсчета IRD (10–12 тыс. зерен/г) во фракции более 150 мкм (рис. 2а). Предполагаемое событие Хайнриха 2 (гор. 38–40 см; 23,4–24,2 тыс.л.н. [14]) выражено слабо (2 тыс. зерен/г) и никак не проявилось в ГР. Интервалы 24–38 и 43–48 см характеризуются отсутствием или очень низким содержанием IRD.

Формирование верхней пачки происходило главным образом за счет пелагического осадения пелитового материала, что нашло отражение в пологой форме бескарбонатных гранулометрических распределений с модой в области пелитовых фракций. Доминирующее содержание *N. pachyderma* (s) (95–100%) является свидетельством присутствия полярных вод в районе исследования (рис. 2б) [10]. В сравниваемой колонке Н-75–4 [9] верхняя пачка также представлена пелагитами (рис. 3).

Можно с большой вероятностью предположить, что интервал 8–48 см соответствует морской изотопной стадии (МИС) 2 и охватывает интервал 14,5–26 тыс.л.н. Уменьшение содержания карбоната кальция до минимума (20%) в интервале 16–22 см наряду с сохранением высоких значений *N. pachyderma* (s) указывает на резкое похолодание, связанное, очевидно, с последним ледниковым максимумом. Известно, что повышенная биопродуктивность планктона, как правило, ассоциируется с гидрологическими фронтами и отражается в повышении числа раковин планктонных фораминифер, а значит, и в содержании карбоната кальция в осадке [15]. В то же время положение находящегося в районе исследования Северного полярного фронта практически совпадает с летней границей плавучих льдов и подвержено климатически обусловленным миграциям [17]. Таким образом, данные

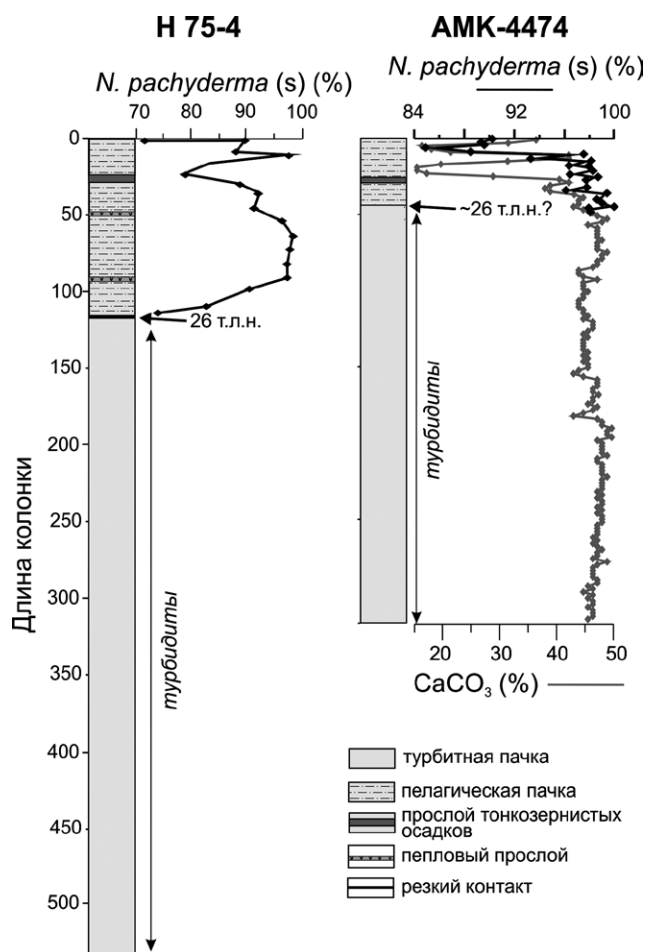


Рис. 3. Литология колонок Н75-4 (по [9]) и АМК-4474, отобранных на прирусловых валах канала.

об уменьшении содержания карбоната кальция в интервале 16–22 см указывают на смещение границы фронта (плавучих льдов) к югу от района исследования во время ледникового максимума [1, 8]. Как следствие, над районом исследования в это время находились холодные полярные воды, комфортные для *N. pachyderma* (s), и плавучие льды, подавляющие биопродуктивность, в том числе и карбонатного планктона. Низкие значения IRD, обнаруженные в этом же временном интервале, также указывают на снижение интенсивности таяния льда, обусловленное удаленностью гидрологического фронта.

Увеличение относительного содержания карбоната кальция на фоне увеличения IRD во время события Хайнриха 1 может свидетельствовать о приближении границы фронта к району исследования и, как следствие, резком увеличении биопродуктивности.

Интервал 0–8 см, вероятно, относится к МИС 1 (последние 14,5 тыс.л.н.). Т.к. вид *N. pachyderma* (s)

является доминирующим в сообществах планктонных фораминифер, уменьшение его содержания в интервале 8–4 см (беллинг-аллеред?) до минимальных значений (84%) может свидетельствовать о резком уменьшении биопродуктивности (уменьшение количества раковин фораминифер в осадке). Это совпадает с уменьшением содержания карбоната кальция в этом интервале. В то же время этот относительно теплый интервал характеризуется резким снижением количества зерен IRD в осадке.

На горизонте 0–4 см содержание *N. pachyderma* (s) снова несколько увеличивается (90–93%), но не достигает «ледниковых» значений. В то же время наблюдается увеличение относительного содержания карбоната кальция от 20 до 40%. Учитывая специфику отбора колонки ударной трубкой и вероятность потери верхних сантиметров осадочного разреза при отборе, а также низкие скорости осадконакопления в районе исследования (~2 см/тыс.л.), интервал 0–4 см, по-видимому, стоит отнести к позднему дриасу.

Нами отмечен интервал с резким уменьшением содержания песчаной и крупносилтовой фракции на гор. 26–30 см (МИС 2). Мы не можем классифицировать его как турбидитный прослой, как это сделано в колонке Н 75-4 [9], т.к. снижение доли крупной фракции обусловлено не поступлением тонкозернистой части турбидитного цикла, а уменьшением поставки IRD в район исследования (рис. 2а) при практически неизменном высоком содержании *N. pachyderma* (s) и некотором увеличении содержания карбоната кальция (на 3–4%).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании детального гранулометрического анализа и сопутствующих литолого-палеонтологических исследований в колонке донных осадков АМК-4474, отобранной в северной части восточного (левого) прируслового вала Северо-Западного атлантического срединно-океанического глубоководного канала, выделено две пачки осадков.

Нижняя пачка представлена тонкозернистыми осадками верхних турбидитных последовательностей, широко распространенными на прирусловых валах канала. Их возраст — не моложе 26 тыс. лет. Поскольку тонкозернистые турбидиты накапливаются в геострофических условиях, как в контурных течениях, то возникновение моды

17–24 мкм в тонких силтовых прослоях может также отражать сходный с контурными течениями процесс сортировки осадочного вещества. Содержание силтовой фракции может быть аналогом показателя SS (sortable silt), введенного для определения скорости контурных течений.

Верхняя пачка, сформировавшаяся, очевидно, в течение последних 26 тыс. лет, представлена пелагическими осадками. Наличие в ней прослоя тонкозернистых осадков обусловлено уменьшением поставки IRD в район исследования.

Источник финансирования. Подсчет IRD и раковин полярного вида фораминифер выполнен при поддержке гранта РФФИ № 14-50-00095. Обобщение и интерпретация результатов литологического описания колонки, гранулометрического анализа и содержания карбоната кальция выполнены в рамках государственного задания ИО РАН (темы № 0128-2019-0011, № 0149-2019-0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бараиш М. С.* Граница плавучих льдов в Северной Атлантике в верхнем Плейстоцене // *Океанология*. 1974. Т. XIV. Вып. 5. С. 846-851.
2. *Баширова Л. Д. и др.* Палеотечения в районе разлома Чарли-Гиббс в позднечетвертичное время // *Океанология*. 2017. Т. 57. № 3. С. 491-502.
3. *Баширова Л. Д. и др.* Особенности позднечетвертичного осадконакопления в северной части Лабрадорского моря // *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Естественные и медицинские науки*. 2018. № 2. С. 44-53.
4. *Akhmetzhanov A. et al.* North Atlantic contourite sand channels // *Economic and Palaeoceanographic Significance of Contourite Deposits / Eds. Viana A. R., Rebesco M. Geological Society, London, Special Publications*, 2007. V. 276. P. 25-47.
5. *Blott S. J., Pye K.* Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments // *Earth Surf Process Landforms*. 2001. V. 26. P. 1237-1248.
6. *Bouma A. H.* Sedimentology of some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation. Amsterdam: Elsevier, 1962. 168 p.
7. *Cossu R., Wells M. G., Peakall J.* Latitudinal variations in submarine channel sedimentation patterns: the role of Coriolis forces // *J. of the Geological Society*. 2015. V. 172. P. 161-174.
8. *Eynaud F., de Abreu L., Voelker A.* Position of the Polar Front along the western Iberian margin during key cold episodes of the last 45 ka // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2009. V. 10. № 7. Q07U05. P. 1-21.
9. *Hesse R., Chough S. K., Rakofsky A.* The North Atlantic Mid-Ocean Channel of the Labrador Sea. V. Sedimentology of a giant deep-sea channel // *Canadian Journal of Earth Science*. 1987. V. 24. P. 1595-1624.

10. *Johannessen T., Jansen E., Flatoy A., Ravelo A. C.* The relationship between surface water masses, oceanographic fronts and paleoclimatic proxies in surface sediments of the Greenland, Iceland, Norwegian seas // *Carbon cycling in the glacial ocean* / Eds. Zahn R. et al. NATO ASI Series, V.I. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1994. 580 p.
11. *Klaucke I., Hesse R., Ryan W.B.F.* Seismic stratigraphy of the Northwest Atlantic Mid-Ocean Channel: growth pattern of a mid-ocean channel-levee complex // *Marine and Petroleum Geology*. 1998. V. 15. P. 575-585.
12. *McCave I.N., Manighetti B., Robinson S.G.* Sortable silt and fine sediment size/composition slicing: parameters for paleocurrent speed and paleoceanography // *Paleoceanography*. 1995. V. 10. P. 593-610.
13. *Rebesco M., Hernández-Molina J., Van Rooij D., Wahlin 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.
14. *Sarnthein M., Statterger K., Dreger D. et al.* Fundamental modes and abrupt changes in North Atlantic circulation and climate over the last 60 ky — Concepts, reconstruction, and numerical modeling // *The Northern North Atlantic: A Changing Environment* / Eds. Schäfer P. et al. Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. P. 365-410.
15. *Sathyendranath S., Longhurst A., Caverhill C.M., Platt T.* Regionally and seasonally differentiated primary production in the North Atlantic // *Deep-Sea Res.* 1995. V. I (42). P. 1773-1802.
16. *Stow D.A.W., Piper D.J.W.* Deep-water fine-grained sediments; history, methodology and terminology // *Fine-Grained Sediments* / Eds. Stow D.A.W., Piper D.J.W. Geological Society Special Publication. 1984. V. 15. P. 3-14.
17. *Swift J.H., Aagaard K.* Seasonal transitions and water mass formation in the Iceland and Greenland seas // *Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1981. V. 28. P. 1107-1129.
18. *Wentworth C.K.* A scale of grade and class terms for clastic sediments // *J. of Geology*. 1922. V. 30. P. 377-392.

LITHODYNAMIC STUDIES NEAR THE NORTHWEST ATLANTIC MID-OCEAN CHANNEL

© 2019 L. D. Bashirova^{1*}, E. V. Dorokhova¹, V. V. Sivkov^{1,2}

¹ *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

² *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

*e-mail: bas_leila@mail.ru

Received November 30, 2019

Revised version received November 30, 2019

After revision February 05, 2019

In AMK-4474 marine sediment core, recovered from the northern part of the eastern (left) levee of the Northwest Atlantic Mid-Ocean Channel, two stratigraphic units were identified. The lower unit is represented by the Late Quaternary fine-grained sediments of the upper turbidite sequences. The presence of a 17–24 μm mode in grain-size distributions within the thin silt interlayers in the lower unit may reflect a sorting process of sedimentary material by the spillover of turbidity currents which is similar to the contour currents activity. This allows applying an indicator of the contour current speed — sortable silt (SS) content — to estimate the intensity of the spill-over current. The upper unit, formed during the last 26 ka, is represented by pelagic sediments. The presence of the fine-grained interlayer in the upper unit of AMK-4474 core is apparently due to a decrease in IRD supply to the study area.

Keywords: Northwest Atlantic Mid-Ocean Channel, turbidites, paleoreconstruction, North Atlantic