УДК 551.89

Я.С. Овсепян[1], Н.О. Аверкина[2], Е.Е. Талденкова[3], Р.Ф. Шпильхаген[4], Х.А. Баух[5], А.В. Тихонова[6]

БЕНТОСНЫЕ ФОРАМИНИФЕРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД В АРКТИЧЕСКИЙ БАССЕЙН В КОНЦЕ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА – ГОЛОЦЕНЕ

На примере колонок морских осадков Арктики и Северной Атлантики анализируется распределение раковин вида-индекса атлантического влияния *Cassidulina neoteretis* и некоторых массовых видов бентосных фораминифер на протяжении периода послеледниковья и голоцена. Для изучения были выбраны ключевые районы на пути следования водных масс атлантического происхождения: западный континентальный склон Великобритании, восточная часть пролива Фрама, континентальный склон моря Лаптевых. Наличие вида *C. neoteretis* в разрезах подтверждает поступление трансформированных атлантических вод в подповерхностном слое в Арктику с самого начала эпохи дегляциации. Повсеместное доминирование этого вида в комплексах фораминифер в период дегляциации с конца события Хайнриха 1 (H1) около 16,5 календарных тысяч лет назад (кал. тыс. л. н.) до 13–12 кал. тыс. л. н. свидетельствует о значительном притоке подповерхностных вод в Арктику с Западно-Шпицбергенским течением в условиях выраженной стратификации вод, вызванной таянием ледниковых щитов. В период с 13–12 до 7 кал. тыс. л. н. отмечается резкое падение относительной численности *C. neoteretis* в исследованных колонках из пролива Фрама и моря Лаптевых, предположительно связанное с развитием глубинной конвекции и сокращением пресноводного влияния в Норвежско-Гренландском бассейне. Рост процентного содержания *C. neoteretis* после 7 кал. тыс. л. н. указывает на некоторое усиление влияния подповерхностных атлантических вод в условиях, соответствующих современному положению уровня моря при постепенном похолодании, усилении ледовитости и растущей стратификации вод.

Ключевые слова: палеогеография, палеоэкология, микрофауна, Северо-Атлантическое течение, пролив Фрама, море Лаптевых

Введение. В Арктике наиболее наглядно проявляется современное изменение климата, выраженное, прежде всего, в потеплении и сокращении площади многолетних морских льдов [Miller et al., 2010; Serreze, Barry, 2011]. Реконструкция климатических событий прошлого помогает понять механизмы глобальных и региональных природных процессов, а также делать прогнозы их развития. Большую роль в высоких широтах играют теплые и соленые водные массы, поступающие в Арктический регион из Атлантики. Вариации Северо-Атлантического течения существенно влияют на климат и масштаб глубинной конвекции в Северной Атлантике [Rahmstorf, 2002; Иванова, 2006]. Поверхностные теплые и соленые воды из Северной Атлантики поступают в восточную часть Норвежско-Гренландского бассейна, где они движутся в составе Норвежского течения. В Гренландском море происходит их охлаждение и погружение: часть вод в результате конвекции идет на формирование Арктической промежуточной водной массы, вовлекаемой в глобальный океанический конвейер. На пути в Северный Ледовитый океан Норвежское течение разделяется на две ветви: Баренцевоморскую, поворачивающую на восток вдоль побережья Скандинавии, и Западно-Шпицбергенскую, огибающую архипелаг Шпицберген [Timokhov, 1994; Rudels et al., 2004]. В Карском море обе ветви течения соединяются и продолжают движение на восток вдоль континентального склона всего Арктического бассейна. В Северном Ледовитом океане воды атлантического происхождения формируют промежуточный слой на глубинах от 150 до 800 м [Rudels et al., 2004].

Среди бентосных фораминифер (самых распространенных представителей мейобентоса) выделяется вид *Cassidulina neoteretis* [Seidenkrantz, 1995], современное и ископаемое распространение которого в осадках Арктики и Норвежско-Гренландского бассейна позволяет считать его видом-индексом прохладных атлантических вод [Mackensen, Hald, 1988; Хусид, Поляк, 1989; Seidenkrantz, 1995; Wollenburg, Mackensen, 1998; Osterman et al., 1999; Lubinski et al., 2001; Wollenburg et al., 2004; Ślubowska et al., 2005; Иванова, 2006; Rasmussen et al., 2007; Лукашина, 2008;

[1] Геологический институт РАН, лаборатория биостратиграфии и палеогеографии океанов, науч. с., канд. геол.-минер. н., *e-mail*: yaovsepyan@yandex.ru

[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, науч. с.; *e-mail*: natal-y@mail.ru

[3] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена, вед. науч. с., канд. геогр. н.; *e-mail*: etaldenkova@mail.ru

[4] Гельмгольц Центр по изучению океана в г. Киль (ГЕОМАР), PhD., Киль, Германия; *e-mail*: rspielhagen@geomar.de

[5] Институт Альфреда Вегенера, PhD., Бремерхавен, Германия; *e-mail*: hbauch@geomar.de

[6] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, лаборатория палеоэкологии и биостратиграфии, науч. с.; *e-mail*: semeonka@gmail.com

Taldenkova et al., 2012; Овсепян с соавт., 2015; Chauhan et al., 2016; Consolaro et al., 2018; Cronin et al., 2019]. В настоящем исследовании рассматривается распределение вида *C. neoteretis* и дополнительно ряда других видов бентосных фораминифер в нескольких колонках, расположенных на континентальном склоне в районах на пути следования атлантических вод от западного побережья Шотландии до моря Лаптевых, что позволит реконструировать некоторые черты позднеплейстоцен-голоценовой истории распространения атлантических вод в Арктике.

Материалы и методы исследования. Колонка морских осадков АИ-3521 отобрана в рейсе НИС «Академик Иоффе» (2016 г.) на северо-восточном континентальном склоне Шотландии (59°30,009 с. ш., 7°20,062 з. д.), на глубине 1051 м (рис. 1), в зоне влияния восточной ветви Северо-Атлантического течения [Клювиткин с соавт., 2017]. Общая мощность осадков – 415 см. Основу комплекса микрофауны составляют планктонные фораминиферы. По данным процентного содержания полярных планктонных фораминифер вида *Neogloboquadrina pachyderma* sin. выполнено предварительное стратиграфическое подразделение разреза, показавшее, что колонка соответствует по времени голоцену и эпохе дегляциации. Данные по содержанию материала ледового и айсбергового разноса (ice- and iceberg-rafted debris, IRD) размерности >250 мкм также используются для оценки предположительного возраста осадков колонки. Бентосные фораминиферы изучены во фракции >100 мкм в образцах мощностью 1 см, отобранных с интервалом в 10–20 см.

Колонка MSM5/5-723-2, полученная в рейсе НИС «Мария С. Мериан» (2007 г.), расположена на континентальном склоне Шпицбергена, в восточной части пролива Фрама (79°09,66 с. ш., 5°20,27 в. д.) (рис. 1) [Müller et al., 2012; Werner et al., 2016]. Место отбора колонки находится на глубине 1349 м, под Западно-Шпицбергенской ветвью атлантического течения, занимающего горизонт от 25 м до 500–700 м водной толщи [Rasmussen et al., 2007]. Микрофоссилии исследованы в верхних 677 см разреза во фракции >63 мкм, образцы мощностью 1 см проанализированы с высоким разрешением – через каждые 5 см. Для верхних 677 см колонки получено 12 радиоуглеродных датировок методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS^{14}C). Календарный (кал.тыс.л.н.) возраст основания исследованного интервала составляет 18,5 кал. тыс. л. н. [Müller et al., 2012; Werner et al., 2016; Овсепян с соавт., 2017].

Две колонки изучены с восточного континентального склона моря Лаптевых (рис. 1), из области распространения трансформированных атлантических вод (горизонт 150–800 м). Колонка PS51/118-11 (77°89,23 с.ш., 132°19,86 в.д,) с глубины 122 м, отобранная в рейсе НИС «Поларштерн» (1998 г.), расположена вблизи верхней границы «атлантического» слоя, где возможен заток этих вод вверх по склону за счет реверсивных течений [Ivanov, Golovin, 2007]. Длина разреза составляет 844 см, верхние 80 см полностью разобраны на образцы мощностью 1 см, из нижней части микрофауна изучалась с интервалом в 10–20 см.

Колонка PS2458-4 (78°10,0 с. ш., 133°23,9 в. д.), полученная в рейсе НИС «Поларштерн» (1993 г.),

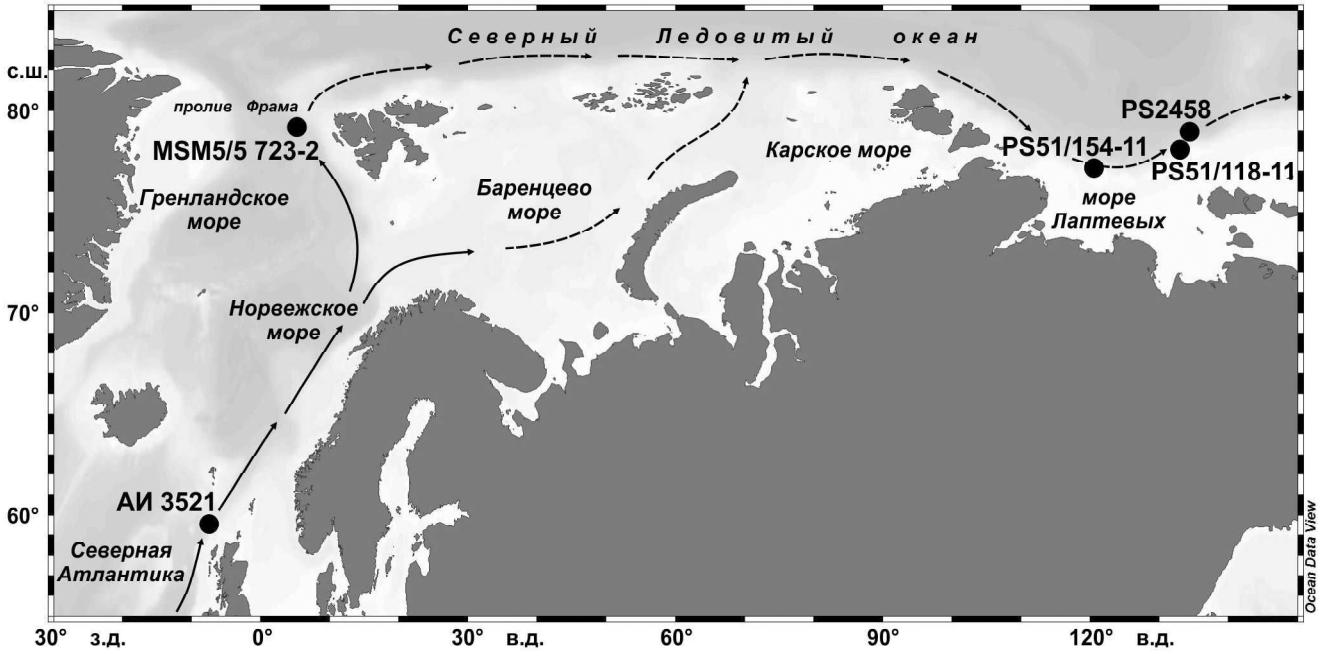

Рис. 1. Карта с местоположениями изученных колонок. Стрелками показаны течения поверхностных атлантических вод, пунктирными стрелками – распространение подповерхностных трансформированных атлантических вод

Fig. 1. The map with locations of the studied cores. Arrows show the flow of surface Atlantic waters, dashed arrows show the flow of subsurface transformed Atlantic waters

расположена на континентальном склоне на глубине 983 м, что немного ниже границы распространения «атлантического» слоя. Длина разреза – 800 см, пробы мощностью 2 см отобраны непрерывно.

Для сравнения используется изученная ранее авторами колонка PS51/154-11 из западной части моря Лаптевых (77°16,56 с. ш., 120°36,59 в. д.) [Taldenkova et al., 2010, 2012; Овсепян с соавт., 2015; Овсепян, 2016]. Колонка мощностью 700 см отобрана на глубине 270 м в ядре трансформированных атлантических вод [Dmitrenko et al., 2008].

Все три колонки из моря Лаптевых детально датированы AMS^{14}C методом. Возраст основания колонки PS51/118-11 составляет ~11 кал. тыс. л. н. [Bauch et al., 2001]. Экстраполированный возраст основания колонок PS2458-4 и PS51/154-11 – 17,6 кал. тыс. л. н. [Spielhagen et al., 2005; Bauch et al., 2001; Taldenkova et al. 2012].

В комплексе микрофоссилий во фракции >63 мкм преобладают бентосные секреционно-известковые фораминиферы, за исключением верхней части колонки PS2458-4 (примерно 1–3 кал. тыс. л. н.), в которой среди редких встреченных фораминифер преобладают агглютинированные формы. Колонки из всех локаций содержат большое количество раковин фораминифер, достаточное для проведения палеоэкологических реконструкций в интервале времени от начала эпохи дегляциации (в изученных датированных колонках это интервал 17,6–18,5 кал. тыс. л. н.) до конца голоцена (0–2 кал. тыс. л. н., в зависимости от сохранности верхних слоев осадков колонки). Содержание вида *C. neoteretis* приводится в процентном соотношении ко всему комплексу бентосных фораминифер.

Результаты. В колонке АИ-3521 из Северной Атлантики, для которой на настоящий момент отсутствует возрастная модель, по распределению *C. neoteretis* с опорой на данные по содержанию *N. pachyderma* sin. и IRD выделено 4 интервала: 240–415 см, 160–240 см, 110–160 см и 0–110 см (рис. 2). Комплекс бентосных фораминифер из нижнего интервала довольно однороден, *C. neoteretis* является доминирующим видом (в среднем 60%), вместе с ним встречаются холодноводные арктические фораминиферы *Cassidulina reniforme, Stainforthia concava, Islandiella norcrossi*. Данный интервал можно скоррелировать с концом ледникового периода – началом дегляциации. В интервале 160–240 см наблюдается резкое снижение доли *C. neoteretis* до 13–20%, его заменяет оппортунистический вид *Elphidium clavatum*, характерный для холодных и опресненных обстановок [Polyak et al., 2002]. Также отмечаются пик *N. pachyderma* sin. среди планктонных фораминифер и обилие IRD. По этим признакам можно предположить, что данный интервал совпадает с событием Хайнриха 1 (H1) (рис. 2). Выше, в интервале 110–160 см, содержание *C. neoteretis* опять увеличивается до 40–60%, а содержание IRD и относительная численность *N. pachyderma* sin. падают, что, вероятно, отражает потепление эпохи беллинг-аллеред и сокращение притока талых ледниковых вод в данном регионе. Выше 110 см *C. neoteretis* постепенно пропадает из разреза и заменяется схожим по морфологии видом *Cassidulina laevigata*. Этот вид характерен для данного региона с начала голоцена и до настоящего времени [Mackensen, Hald, 1988], но отмечен и в осадках конца эпохи беллинг-аллеред [Klitgaard-Kristensen et al., 2001].

В колонке MSM5/5-723-2 из пролива Фрама, в целом наблюдается схожее распределение *C. neoteretis* по разрезу (рис. 2). В данном случае на основе возрастной модели можно выделить следующие временные интервалы: дегляциальный, переходный, голоценовый. В нижней части исследованного разреза возрастом 12,3–18,5 кал. тыс. л. н., относящейся к дегляциальной эпохе, *C. neoteretis* преобладает в комплексе бентосных фораминифер (в среднем 70%). Исключение составляет период около 17 кал. тыс. л. н. (событие Хайнриха 1), когда содержание *C. neoteretis* падает до 30%. Короткий переходный период 11,5–12,3 кал. тыс. л. н. соответствует позднему дриасу и началу голоцена, здесь содержание вида *C. neoteretis* сокращается до 10–30%, его постепенно заменяет холодноводный арктический вид *C. reniforme*. В голоцене, в интервале 0,2–11,5 кал. тыс. л. н., содержание *C. neoteretis* сокращается до 3–20%, особенно мало *C. neoteretis* между 11,5 и 9,5 кал. тыс. л. н. После 11,5 и до 7 кал. тыс. л. н. доминирующими в комплексе наряду с *C. reniforme* становятся глубоководные эпифаунные виды *Cibicidoides wuellerstorfi* и *Oridorsalis umbonatus*, большую роль в комплексе играют также виды *Nonion labradoricum* и *Epistominella exsigua,* отражающие увеличение продуктивности.

В ранее изученной колонке PS51/154-11 из западной части моря Лаптевых [Taldenkova et al., 2010, 2012; Овсепян с соавт. 2015; Овсепян, 2016] вид *C. neoteretis* чаще встречается в дегляциальной части разреза в интервале времени 12–15,6 кал. тыс. л. н., где его численность составляет в среднем около 20%, но в некоторых пробах достигает 40-60% (рис. 2). В интервале времени между 12 и 7 кал. тыс. л. н. раковины *C. neoteretis* практически отсутствуют. Верхний пик численности вида (максимум до 10–11%) приурочен к интервалу времени 3–5 кал. тыс. л. н., небольшое увеличение численности отмечено также около 2 кал. тыс. л. н.

В колонках из восточной части моря Лаптевых содержание *C. neoteretis* различается, что обусловлено глубиной отбора колонок. Изначально предполагалось, что в колонке PS51/118-11 с верхнего континентального склона по аналогии с ранее изученной колонкой из западной части моря PS51/154-11 (глубина 270 м) будет найдено множество раковин атлантического вида-индекса [Taldenkova et al., 2012; Овсепян с соавт., 2015]. Однако вид *C. neoteretis* встретился только в верхней, голоценовой части разреза, в интервале 2,7–8,2 кал. тыс. л. н. (рис. 2). Его доля в комплексе фораминифер очень мала и составляет максимум 3% в отдельных пробах.

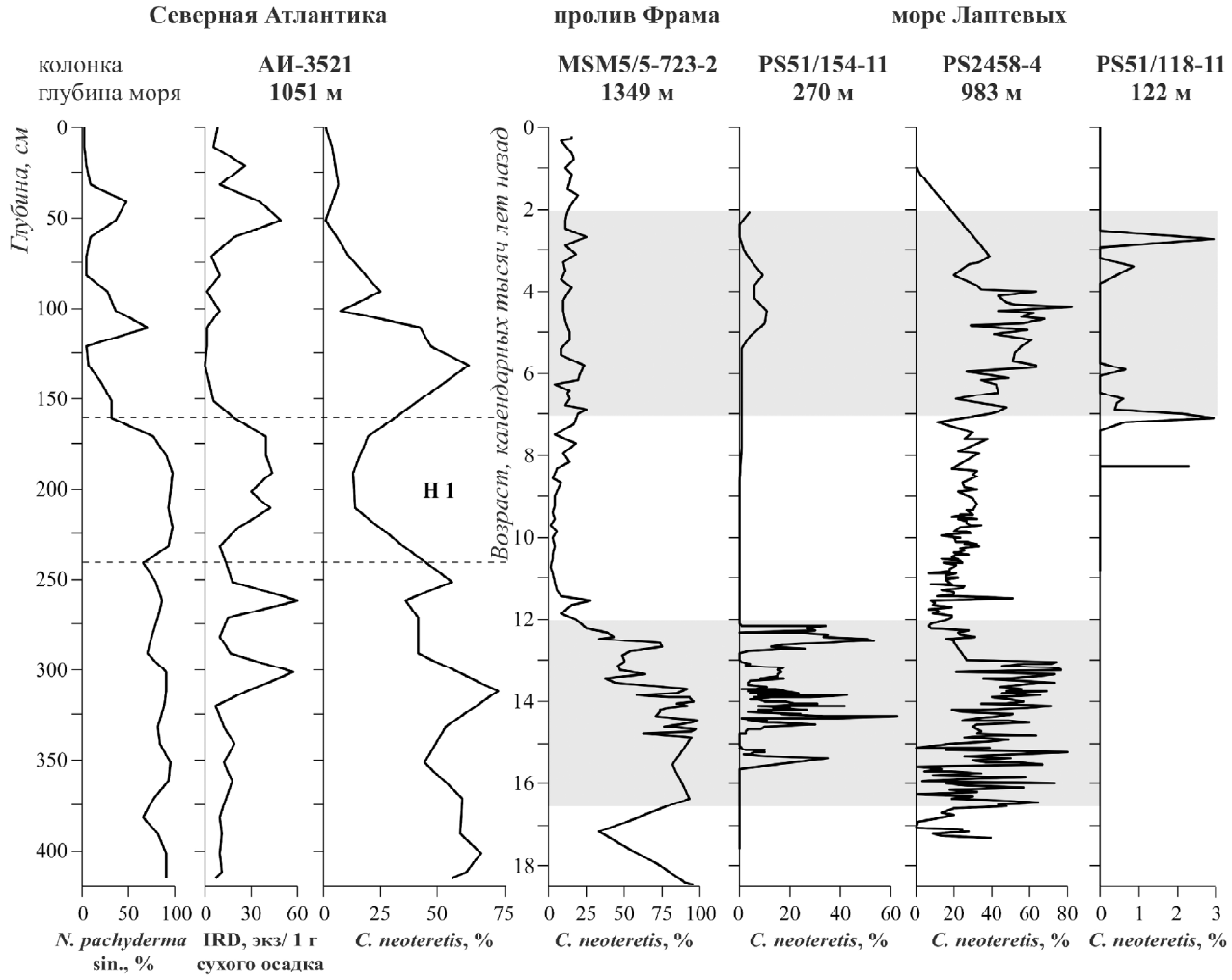

Рис. 2. Распределение процентного содержания вида *Cassidulina neoteretis* в изученных колонках. Серым фоном выделены периоды усиления атлантического влияния: дегляциальный 12(13)–16,5 кал. тыс. л. н. и средне-позднеголоценовый 2–7 кал. тыс. л. н. Для колонки АИ-3521 пунктиром выделен интервал, относящийся к событию Хайнриха 1 (H1), для подтверждения стратиграфического подразделения приведены графики процентного содержания *Neogloboquadrina pachyderma* sin. и материала ледового и айсбергового разноса (IRD)

Fig. 2. Downcore distribution of the relative abundance of *Cassidulina neoteretis* in the studied cores. Gray shading highlights the intervals of increased Atlantic influence during the deglaciation (12(13)–16,5 cal.ka) and the mid-late Holocene (2–7 cal.ka), correspondingly. For core AI-3521: dotted lines mark the interval of Heinrich 1 event (H1), the plots of the relative abundance of *Neogloboquadrina pachyderma* sin. and ice- and iceberg-rafted debris (IRD) distribution are shown to prove the stratigraphic divisionn

В более глубоководной колонке PS2458-4 *C. neoteretis* присутствует практически во всех образцах, начиная с самой нижней части разреза (рис. 2). В интервале 13–16,5 кал. тыс. л. н. *C. neoteretis* составляет в среднем 40–60% от общего комплекса фораминифер. На рубеже 13 кал. тыс. л. н. его содержание резко падает, здесь происходит смена доминантного вида на *C. reniforme.* Выше по разрезу, примерно после 7 и до 3 кал. тыс. л. н., *C. neoteretis* снова достигает прежних высоких значений. В самых молодых осадках возрастом 1–3 кал. тыс. л. н., в которых преобладают агглютинированные фораминиферы, недостаточно материала для статистически достоверного анализа, однако немногочисленные раковины *C. neoteretis* присутствуют в осадках этого интервала.

Обсуждение результатов. Современное распределение бентосного вида фораминифер *C. neoteretis* охватывает Северный Ледовитый океан и Норвежско-Гренландский бассейн. На склонах Норвежской котловины и в проливе Фрама вид встречается на глубинах от 500 до 1600 метров [Mackensen, Hald, 1988; Rasmussen et al., 2007; Лукашина, 2008]. Верхняя граница обитания вида пересекается с диапазоном распространения вод Норвежского течения, достигающих глубин 800 м. *C. neoteretis* также связан с распространением сезонных морских льдов и вызванной ими стратификацией за счет летнего таяния [Rasmussen et al., 2007]. Южнее 70° с. ш. его замещает сходный по морфологии вид *C. laevigata* [Mackensen, Hald, 1988]. В поверхностных осадках Северной Атлантики южнее Фареро-Шетландского желоба раковины живых представителей *C. neoteretis* не были обнаружены [Mackensen, Hald, 1988]. В Северном Ледовитом океане *C. neoteretis* распространен вдоль континентального склона и

характерен для глубин 200–1500 м [Wollenburg, Mackensen, 1998; Wollenburg et al., 2004; Osterman et al., 1999; Husum et al., 2015; Chauhan et al., 2016; Cronin et al., 2019]. Вид встречен также в трогах Баренцева и Карского морей и связан с промежуточным слоем атлантического происхождения (150–800 м) [Хусид, Поляк, 1989; Steinsund, 1994; Lubinski et al., 2001; Иванова, 2006; Ślubowska et al., 2005]. В целом, экологические предпочтения вида можно сформулировать следующим образом – это инфаунный вид, обитающий в придонных обстановках с постоянной соленостью и температурой на континентальном склоне субарктических и арктических районов в местах распространения прохладных атлантических вод как на поверхности, так и под слоем полярных опресненных вод с сезонным ледовым покровом [Rasmussen et al., 2007; Chauhan et al., 2016]. При этом до сих пор нет объяснения, каким именно образом атлантические воды контролируют распределение этого вида, но очевидно, что его высокая численность является свидетельством длительного присутствия атлантических вод в конкретном исследуемом районе [Osterman et al., 1999]. В рассматриваемых нами колонках, находящихся на пути следования атлантических вод из Северной Атлантики через пролив Фрама до моря Лаптевых, отмечено много сходных черт в вариациях численности вида *C. neoteretis* в различные периоды времени с начала дегляциации (рис. 2), что, на наш взгляд, указывает на существенное влияние атлантических вод на распределение этого вида.

В самой нижней части колонки из Северной Атлантики АИ 3521, предположительно относящейся к концу ледникового периода, отмечено преобладание *C. neoteretis* в комплексе фораминифер, что соотносится с другими колонками из этого региона, когда холодные атлантические воды занимали всю толщу вод на континентальном слоне [Mackensen, Hald, 1988; Rasmussen et al., 2007; Лукашина, 2008].

В наиболее длинных по временному охвату датированных колонках из пролива Фрама и восточной части моря Лаптевых (PS2458) отмечено высокое содержание *C. neoteretis* в самом начале дегляциации до 16,5 кал. тыс. л. н. Эти колонки находятся на достаточно больших глубинах более 900 м. В то же время в одновозрастных осадках колонки PS51/154 из западной части моря Лаптевых с современной глубины моря 270 м (около 170–150 м в эпоху ранней дегляциации) *C. neoteretis* встречена единично в прослое возрастом 17,1–17,2 кал. тыс. л. н., тогда как все остальные осадки этой колонки в интервале от 17,6 до 16 кал. тыс. л. н. не содержат бентосных фораминифер, что наряду с наличием большого количества аутигенных конкреций свидетельствует об анаэробных условиях на дне, вероятно, вызванных стратификацией за счет притока талых вод [Taldenkova et al., 2010]. Эта колонка находилась выше верхней границы распространения атлантических вод, и они только эпизодически поднимались вверх по склону с апвеллингами, вызванными ветрами, дующими с холодной суши [Taldenkova et al., 2010]. В целом, присутствие *C. neoteretis* в колонках с континентального склона моря Лаптевых, начиная с 17,6 кал. тыс. л. н., свидетельствует о проникновении атлантических вод в Арктику далеко на восток вдоль континентальной окраины Евразии уже во время ранней дегляциации. Это подтверждают и находки тепловодных планктонных фораминифер в разрезах обеих колонок в интервале времени между 17 и 17,6 кал. тыс. л. н., которые не встречаются в более молодых осадках [Taldenkova et al., 2010, 2012; Овсепян с соавт., 2015]. Вероятно, для столь дальнего проникновения относительно теплых атлантических вод условия были обусловлены сильной стратификацией вод в Норвежско-Гренландском бассейне после начала таяния европейских ледников 19 кал. тыс. л. н., что обеспечивало погружение атлантических вод под слой опресненных поверхностных вод в пределах умеренных широт, существенно южнее, чем в настоящее время. Некоторое уменьшение процентного содержания *C. neoteretis* во время события Хайнриха 1 около 17 кал. тыс. л. н., отмеченное в исследованных колонках в Северной Атлантике, проливе Фрама и в море Лаптевых, могло быть связано с особенно сильным опреснением. В данный период *C. neoteretis* замещается другими видами, такими как *E. clavatum* в колонке АИ3521, или разнообразными агглютинирующими фораминиферами в колонке PS2458.

Процентное содержание *C. neoteretis* было самым высоким во всех исследованных колонках в период с конца события Хайнриха 1 около 16,5 кал. тыс. л. н. до 12–13 кал. тыс. л. н. (рис. 2). В глубоководных колонках из Сев. Атлантики, пролива Фрама и в восточной части моря Лаптевых содержание этого вида составляло в среднем 50–60%, а в более мелководной колонке из западной части моря Лаптевых – 20–30%. Это свидетельствует о значительном притоке подповерхностных атлантических вод в Арктику с Западно-Шпицбергенским течением в условиях по-прежнему сильно выраженной стратификации вод, вызванной таянием ледниковых щитов. Баренцевоморской ветви атлантического течения во время ранней дегляциации не существовало из-за пониженного уровня моря и ледникового щита на шельфе, поэтому весь поток подповерхностных атлантических вод был связан с северной ветвью течения [Lubinski et al., 2001; Rasmussen et al., 2007]. Баренцевоморская ветвь развивалась постепенно вслед за таянием остатков ледникового щита; так, в осадках юго-западной части Баренцева моря *C. neoteretis* появляется впервые около 14 кал. тыс. л. н. [Чистякова с соавт., 2010].

Начиная с позднего дриаса, 12–13 кал. тыс. л. н. и в течение раннего голоцена (примерно до 7 кал. тыс. л. н.) процентное содержание *C. neoteretis* во всех исследованных датированных колонках резко уменьшилось, а в колонке с западного континентального склона моря Лаптевых этот вид практически отсутствует в осадках возрастом 8–12 кал. тыс. л. н.

(рис. 2). В колонке из Северной Атлантики *C. neoteretis* постепенно замещается более тепловодным видом *C. laevigata*. Таким образом, можно предположить, что в период голоценового оптимума приток подповерхностных атлантических вод в Арктику сократился. По всей видимости, это не совсем верное утверждение, правильнее сказать, что кардинальным образом изменились природные условия. Приток талых вод прекратился, и атлантические воды появились на поверхности. В результате в районе пролива Фрама началось развитие активной глубинной конвекции, при которой часть вод направляется на формирование северо-атлантической глубинной водной массы – важнейшего компонента океанического конвейера [Иванова, 2006]. О начале этого процесса свидетельствует появление в колонке из пролива Фрама глубоководных видов, эпифаунного *C. wuellerstorfi* и поверхностно-инфаунного *O. umbonatus*, связанных с поступлением холодных вод, богатых кислородом, на дно. Эти виды, наряду с *C. reniforme*, который предпочитает более холодные придонные обстановки, чем *C. neoteretis,* доминировали в составе комплекса в раннем голоцене, в период от 11,5 до 6 кал. тыс. л. н. Вероятно, развитие активной глубинной конвекции в условиях отсутствия стратификации и сезонного ледового покрова в проливе Фрама в фазу высокой инсоляции раннего голоцена в определенной мере действительно сократило приток подповерхностных атлантических вод с северной, фрамовской, ветвью в море Лаптевых. Наряду с этим был период активного влияния теплых поверхностных атлантических вод в районе Шпицбергена, о чем, например, свидетельствует продвижение на север ряда бореальных видов моллюсков [Salvigsen et al., 1992]. Одновременно в раннем голоцене возрастает поступление атлантических вод с баренцевоморской ветвью. В колонке из юго-западной части Баренцева моря процентное содержание *C. neoteretis* максимально (50–60%) в период между 11,7 и 7,8 кал. тыс. л. н. [Чистякова с соавт., 2010]. Отсутствие *C. neoteretis* в осадках колонок из северных трогов Баренцева моря в период между началом голоцена и примерно 8 кал. тыс. л. н. наряду с характерным изотопным составом карбоната раковин фораминифер свидетельствуют о доминировании баренцевоморских атлантических вод и существенном сокращении влияния фрамовской ветви [Lubinski et al., 2001].

После примерно 7 кал. тыс. л. н. относительная численность *C. neoteretis* в колонках из моря Лаптевых возрастает, в особенности это касается наиболее глубоководной колонки PS2458 (рис. 2). Незначительно увеличивается содержание этого вида и в колонке из пролива Фрама (рис. 2), а также в северных трогах Баренцева моря [Lubinski et al., 2001]. Одновременно значительно уменьшается роль глубоководных видов в исследованной колонке из пролива Фрама. В совокупности, это указывает на усиление притока атлантических вод с фрамовской ветвью и ослабление масштабов глубинной конвекции. После 7 кал. тыс. л. н. отмечается увеличение размеров сезонного ледового покрова в проливе Фрама [Müller et al., 2012], что способствовало развитию стратификации вод за счет их летнего таяния. Уровень моря был близок к современным значениям, и шельфы евразийских морей были практически полностью затоплены. В среднем и позднем голоцене активное ледообразование в этих морях и обильный речной сток приводили к растущему экспорту пресных вод и льдов с Трансполярным дрейфом и Восточно-Гренландским течением в западную часть пролива Фрама, что могло явиться причиной усиления противотока подповерхностных атлантических вод с фрамовской ветвью [Mysak, 2001].

Выводы:

– обзор микропалеонтологического материала по ряду колонок, расположенных на пути распространения атлантических вод с фрамовской ветвью от Северной Атлантики через пролив Фрама в море Лаптевых, с привлечением литературных данных показал общую тенденцию распределения раковин бентосного вида фораминифер *Cassidulina neoteretis* в позднеплейстоцен-голоценовых отложениях;

– в Арктике вид *C. neoteretis* в настоящее время обитает на глубинах от 200 до 1500 м и связан как с распространением сезонного ледового покрова и опресненных поверхностных арктических вод, так и с более теплыми подповерхностными водными массами атлантического происхождения. Наличие вида *C. neoteretis* в исследованных разрезах подтверждает факт поступления трансформированных атлантических вод в подповерхностном слое в Арктику с самого начала эпохи дегляциации;

– повсеместное доминирование этого вида в комплексах фораминифер в период дегляциации с конца события Хайнриха 1 около 16,5 кал. тыс. л. н. до 13–12 кал. тыс. л. н. свидетельствует о значительном притоке подповерхностных вод в Арктику с Западно-Шпицбергенским течением в условиях выраженной стратификации вод, вызванной таянием ледниковых щитов. До 14 кал. тыс. л. н. это был единственный путь поступления атлантических вод в Арктику, т. к. баренцевоморская ветвь еще не существовала;

– в период с 13–12 до 7 кал. тыс. л. н. отмечается резкое падение относительной численности *C. neoteretis* в исследованных колонках из пролива Фрама и моря Лаптевых, предположительно связанное с развитием глубинной конвекции и сокращением пресноводного влияния в Норвежско-Гренландском бассейне;

– рост процентного содержания *C. neoteretis* после 7 кал. тыс. л. н. указывает на некоторое усиление влияния подповерхностных атлантических вод в условиях, соответствующих современному положению уровня моря при постепенном похолодании, усилении ледовитости и растущей стратификации вод;

– судя по численности *C. neoteretis* в голоценовых осадках трех колонок из моря Лаптевых, наиболее благоприятные условия для этого вида в Арктике создаются не в ядре атлантических вод на глубинах 200–350 м, а непосредственно под слоем атлантических вод.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.Г. Матулю и А.П. Лисицыну за предоставленный материал. Исследования Овсепяна Я.С. и Аверкиной Н.О. выполнены за счет РФФИ (проект № 18-35-00362 мол_а). Исследования Талденковой Е.Е. поддержаны субсидией Минобрнауки по проекту «Изменчивость Арктической Трансполярной системы» (CATS) (уникальный идентификатор проекта – RFMEFI61617X0076), исследования Шпильхагена Р.Ф. и Бауха Х.А. – Министерством образования и науки Германии по проекту CATS (№ 03F0776). Работа Тихоновой А.В. проводилась по теме № 0149-2019-0007 Госзадания ИО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Иванова Е.В. Глобальная термохалинная палеоциркуляция. М.: Научный мир, 2006. 314 с.

Клювиткин А.А., Политова Н.В., Новигатский А.Н., Новичкова Е.А., Савичев А.С., Козина Н.В., Стародымова Д.П., Тихонова А.В., Амбросимов А.К., Будько Д.Ф., Исаченко С.М., Булохов А.В. Геологические исследования Северной Атлантики в 51-м рейсе «Академик Иоффе» // Океанология. 2017. Т. 5. № 3. С. 514–516.

Лукашина Н.П. Палеоокеанология Северной Атлантики в позднем мезозое и кайнозое и возникновение современной термогалинной океанской циркуляции по данным изучения фораминифер. М.: Научный мир, 2008. 288 с.

Овсепян Я.С. Позднечетвертичные фораминиферы моря Лаптевых и реконструкции изменения среды на основе палеоэкологического анализа. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минерал. н. М.: 2016. 240 с.

Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Баух Х.А., Кандиано Е.С. Реконструкция событий позднего плейстоцена–голоцена на континентальном склоне моря Лаптевых по комплексам бентосных и планктонных фораминифер // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 964–112.

Овсепян Я.С., Талденкова Е.Е., Чистякова Н.О., Степанова А.Ю., Шпильхаген Р.Ф. Позднечетвертичные реконструкции палеоклимата в проливе Фрама в контексте проникновения атлантических вод в Арктику // Геология морей и океанов: Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М.: ИО РАН, 2017. Т. 2. С. 87–90.

Хусид Т.А., Поляк Л.В. Биогеография бентосных фораминифер Арктики // Неоген-четвертичная палеоокеанология по микропалеонтологическим данным. М.: Наука, 1989. С. 42–50.

Чистякова Н.О., Иванова Е.В., Рисебробаккен Б., Овсепян Е.А., Овсепян Я.С. Реконструкция послеледниковых обстановок в юго-западной части Баренцева моря по комплексам фораминифер // Океанология. 2010. Т. 50. №4. С. 608–617.

Bauch H.A., Müeller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global Planet. Change. 2001. Vol. 31. P. 125–139.

Chauhan T., Rasmussen T.L., Noormets R. Palaeoceanography of the Barents Sea continental margin, north of Nordaustlandet, Svalbard, during the last 74 ka // Boreas. 2016. Vol. 45. P. 76–99.

Consolaro C., Rasmussen T.L., Panieri G. Palaeoceanographic and environmental changes in the eastern Fram Strait during the last 14 000 years based on benthic and planktonic foraminifera // Mar. Micropal. 2018. Vol. 139. P. 84–101.

Cronin T.M., Seidenstein J., Keller K., McDougall K., Ruefer A., Gemery L. The benthic foraminifera *Cassidulina* from the Arctic Ocean: application to paleoceanography and biostratigraphy // Micropaelontology. 2019. Vol. 65. № 2. P. 105–125.

Dmitrenko I.A., Polyakov I.V., Kirillov S.A., Timokhov L.A., Frolov I.E., Sokolov V.T., Simmons H.L., Ivanov V.V., Walsh D. Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of an early 21st century Atlantic Water warm anomaly along the Eurasian Basin margin // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. C05023.

Husum K., Hald M., Stein R., Weiıschnur M. Recent benthic foraminifera in the Arctic Ocean and Kara Sea continental margin // Arktos. 2015. doi: 10.1007/s41063-015-0005-9

Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C09003.

Klitgaard-Kristensen D., Sejrup H.P., Haflidason H. The last 18 kyr fluctuations in Norwegian Sea surface conditions and implications for the magnitude of climatic change: Evidence from the North Sea // Paleoceanography. 2001. Vol. 16. № 5. P. 455-467.

Lubinski D.J., Polyak L.A., Forman S.L. Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara seas since ca 13 14C ka: foraminifera and stable isotopes // Quat. Sci. Rev. 2001. Vol. 20. P. 1851–1879.

Mackensen A., Hald M. Cassidulina teretis Tappan and C. laevigata d'Orbigny: their modern and late quaternary distribution in northern seas // J. Foraminiferal Res. 1988. Vol. 18. № 6. P. 16–24.

Miller G.H., Alley R.B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J.J., Polyak L., Serreze M.C., White J. Arctic amplification: can the past constrain the future? // Quat. Sci. Rev. 2010. Vol. 29. P. 1779–1790.

Müller J., Werner K., Stein R., Fahl K., Moros M., Jansen E. Holocene cooling culminates in sea ice oscillations in Fram Strait // Quat. Sci. Rev. 2012. Vol. 47. P. 1–14.

Mysak L.A. Patterns of Arctic circulation // Science. 2001. Vol. 293. P. 1269–1270.

Osterman L.E., Poore R.Z., Foley K.M. Distribution of benthic foraminifers (>125 мм) in the surface sediments of the Arctic Ocean // USGS Bulletin. 1999. Vol. 2164. doi: 10.3133/b2164

Polyak L., Korsun S., Febo L., Stanovoy V., Khusid T., Hald M., Paulsen B.E., Lubinski D.A. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced arctic marine environment // J. of Foraminiferal Res. 2002. Vol. 32. № 3. P. 252–273.

Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120000 Years // Nature. 2002. Vol. 419. P. 207–214.

Rasmussen T.L., Thomsen E., Ślubowska M.A., Jessen S., Solheim A., Koз N. Paleoceanographic evolution of the SW Svalbard margin (76°N) since 20,000 14C yr BP // Quaternary Research. 2007. Vol. 67. P. 100–114.

Rudels B., Jones E.P., Schauer U., Eriksson P. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters // Polar Research. 2004. Vol. 23. P. 181–208.

Salvigsen O., Forman S.L., Miller G.H. Thermophilous molluscs on Svalbard during the Holocene and their paleoclimatic implications // Polar Research. 1992. Vol. 11. P. 1–10.

Seidenkrantz M.-S. Cassidulina teretis Tappan and *Cassidulina neoteretis* new species (Foraminifera): stratigraphic markers for deep sea and outer shelf areas // J. Micropalaeontology. 1995. Vol. 14. P. 145–157.

Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis // Global Planet. Change. 2011. Vol. 77. P. 85–96.

Ślubowska M.A., Koз N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D. Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: Evidence from the northern Svalbard continental margin, 80°N // Palaeoceanography. 2005. Vol. 20. PA4014.

Spielhagen R.F., Erlenkeuser H., Siegert C. History of freshwater runoff across the Laptev Sea (Arctic) during the last deglaciation // Global Planet. Change. 2005. Vol. 48. P. 187–207.

Steinsund P.I. Benthic foraminifera in the surface sediments of the Barents, Kara Seas: modern and late Quaternary applications // Dissertation. University of Tromsш. 1994.

Taldenkova E., Bauch H.A., Gottschalk J., Nikolaev S., Rostovtseva Yu., Pogodina I., Ovsepyan Ya., Kandiano E. History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times // Quat. Sci. Rev. 2010. Vol. 29. P. 3919–3935.

Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Ya., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S. Benthic community changes at the North Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times // Mar. Micropal. 2012. Vol. 96–97. P. 13–28.

Timokhov L.A. Regional characteristics of the Laptev and the East Siberian seas: climate, topography, ice phases, thermohaline regime, circulation // Berichte zur Polarforschung. 1994. Vol. 144. P. 15–31.

Werner K., Müller J., Husum K., Spielhagen R., Kandiano E., Polyak L. Holocene sea subsurface and surface water masses in the Fram Strait – Comparisons of temperature and sea-ice reconstructions // Quat. Sci. Rev. 2016. Vol. 147. P. 194–209.

Wollenburg J., Mackensen A. Living benthic foraminifers from the central Arctic Ocean: faunal composition, standing stock and diversity // Mar. Micropal. 1998. Vol. 34. № 3–4. P. 153–185.

Wollenburg J.E., Knies J., Mackensen A. High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean // Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol. 2004. Vol. 204. P. 209–238.

Поступила в редакцию 26.03.2018
После доработки 28.06.2019
Принята к публикации 28.06.2019

Ya.S. Ovsepyan [1], N.O. Averkina[2], E.E. Taldenkova[3], R.F. Spielhagen [4], H.A. Bauch [5], A.V. Tikhonova[6]

BENTHIC FORAMINIFERS AS INDICATORS OF ATLANTIC WATER INFLUENCE IN THE ARCTIC DURING THE LATE PLEISTOCENE AND THE HOLOCENE

The distribution of the tests of Atlantic water index species *Cassidulina neoteretis* and several other common benthic foraminiferal species in the Postglacial and Holocene sediments is analysed in marine sediment cores recovered in the Arctic and North Atlantic. The following key regions located on the pathway of Atlantic waters were selected: the western continental slope of the Great Britain, the eastern Fram Strait and the Laptev Sea continental slope. The occurrence of *C. neoteretis* in the studied sections gives evidence for the inflow of subsurface Atlantic waters to the Arctic since the onset of deglaciation period. The similar pattern of the predominance of *C. neoteretis* in the cores during the early deglaciation since the end of the Heinrich 1 event about 16,5 cal.ka until 13–12 cal.ka gives evidence for a strong inflow of subsurface Atlantic waters with the Fram Strait Branch under meltwater induced stratified conditions. During the time period between 13–12 to 7 cal.ka the relative abundance of *C. neoteretis* decreases in the cores from the Fram Strait and the Laptev Sea, probably in relation to the onset of deep convection and the reduction of freshwater influence in the Nordic seas. The growing representation of *C. neoteretis* after 7 cal.ka manifests an increase in the subsurface Atlantic water influence under modern-like sea-level position, growing climate cooling trend, sea-ice cover expansion and enhanced water stratification.

Key words: paleogeography, paleoecology, microfauna, North Atlantic Current, Fram Strait, Laptev Sea

Acknowledgements. Authors acknowledge A.G. Matul and A.P. Lisitzin for provided material. This research was supported by: RFBR, project 18-35-00362 mol_a (Ovsepyan, Averkina); the Russian-German project CATS, funded by the Ministry of Science of the Russian Federation (RFMEFI61617X0076) (Taldenkova) and the German Ministry of Education and Research (03F0776) (Spielhagen, Bauch); the State Contract of Shirshov Institute of Oceanology 0149-2019-0007 (Tikhonova).

[1] Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of ocean biostratigraphy and paleogeography, Scientific Researcher, PhD in Geology and Mineralogy; *e-mail*: yaovsepyan@yandex.ru

[2] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Pleistocene paleogeography, Scientific Researcher; *e-mail*: natal-y@mail.ru

[3] Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Pleistocene paleogeography, Leading Scientific Researcher, PhD in Geography; *e-mail*: etaldenkova@mail.ru

[4] Helmholz Center for Ocean Research in Kiel (GEOMAR), PhD., Kiel, Germany, PhD in Geology; *e-mail*: rspielhagen@geomar.de

[5] Alfred Wegener Institute (AWI), PhD., Bremerhaven, Germany, PhD in Geology; *e-mail*: hbauch@geomar.de

[6] Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of paleoecology and biostratigraphy, Scientific Researcher; *e-mail*: semeonka@gmail.com

REFERENCES

Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E., Spielhagen R.F., Kassens H., Grootes P.M., Thiede J., Heinemeier J., Petryashov V.V. Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global Planet. Change. 2001. Vol. 31. P. 125–139.

Chauhan T., Rasmussen T.L., Noormets R. Palaeoceanography of the Barents Sea continental margin, north of Nordaustlandet, Svalbard, during the last 74 ka // Boreas. 2016. Vol. 45. P. 76–99.

Chistyakova N.O., Ivanova E.V., Risebrobakken B., Ovsepyan E.A., Ovsepyan Ya.S. Rekonstruktsiya poslelednikovykh obstanovok v yugo-zapadnoi chasti Barentseva morya po kompleksam foraminifer [Reconstruction of postglacial environments in the southwestern Barents Sea based on foraminifera assemblages] // Okeanologiya. 2010. Vol. 50. № 4. P. 608–617. (in Russian)

Consolaro C., Rasmussen T.L., Panieri G. Palaeoceanographic and environmental changes in the eastern Fram Strait during the last 14 000 years based on benthic and planktonic foraminifera // Mar. Micropal. 2018. Vol. 139. P. 84–101.

Cronin T.M., Seidenstein J., Keller K., McDougall K., Ruefer A., Gemery L. The benthic foraminifera *Cassidulina* from the Arctic Ocean: application to paleoceanography and biostratigraphy // Micropaelontology. 2019. Vol. 65. № 2. P. 105–125.

Dmitrenko I.A., Polyakov I.V., Kirillov S.A., Timokhov L.A., Frolov I.E., Sokolov V.T., Simmons H.L., Ivanov V.V., Walsh D. Toward a warmer Arctic Ocean: Spreading of an early 21st century Atlantic Water warm anomaly along the Eurasian Basin margin // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. C05023.

Husum K., Hald M., Stein R., WeiЯschnur M. Recent benthic foraminifera in the Arctic Ocean and Kara Sea continental margin // Arktos. 2015. DOI 10.1007/s41063-015-0005-9.

Ivanov V.V., Golovin P.N. Observations and modeling of dense water cascading from the northwestern Laptev Sea shelf // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. C09003.

Ivanova E.V. Global'naya termokhalinnaya paleotsirkulyatsiya [The Global Thermohaline Paleocirculation] M.: Nauchnyi mir, 2006. 314 p. (in Russian)

Klitgaard-Kristensen D., Sejrup H.P., Haflidason H. The last 18 kyr fluctuations in Norwegian Sea surface conditions and implications for the magnitude of climatic change: Evidence from the North Sea // Paleoceanography. 2001. Vol. 16. № 5. P. 455–467.

Khusid T.A., Polyak L.V. Biogeografiya bentosnykh foraminifer Arktiki [Biogeography of benthic foraminifera in the Arctic] // Neogen-chetvertichnaya paleookeanologiya po mikropaleontologicheskim dannym M.: Nauka, 1989. P. 42–50. (in Russian)

Kljuvitkin A.A., Politova N.V., Novigatskii A.N., Novichkova E.A., Savvichev A.S., Kozina N.V., Starodymova D.P., Tikhonova A.V., Ambrosimov A.K., Bud'ko D.F., Isachenko S.M., Bulokhov A.V. Geologicheskie issledovaniya Severnoi Atlantiki v 51-m reise «Akademik Ioffe» [Geological investigation of the Northern Atlantic in the 51st «Academic Ioffe» cruise] // Okeanologiya. 2017. Vol. 5. № 3. P. 514–516. (in Russian)

Lubinski D.J., Polyak L.A., Forman S.L. Freshwater and Atlantic water inflows to the deep northern Barents and Kara seas since ca 13 14C ka: foraminifera and stable isotopes // Quat. Sci. Rev. 2001. Vol. 20. P. 1851–1879.

Lukashina N.P. Paleookeanologiya Severnoi Atlantiki v pozdnem mezozoe i kainozoe i vozniknovenie sovremennoi termogalinnoi okeanskoi tsirkulyatsii po dannym izucheniya foraminifer [Paleooceanology of the Nothern Atlantic in the Late Mesozoic and Cenozoic and the initiation of modern thermohaline ocean circulation according to foraminifera data] M.: Nauchnyi mir, 2008. 288 p. (in Russian)

Mackensen A., Hald M. Cassidulina teretis Tappan and C. laevigata d'Orbigny: their modern and late quaternary distribution in northern seas // J. Foraminiferal Res. 1988. Vol. 18. № 6. P. 16–24.

Miller G.H., Alley R.B., Brigham-Grette J., Fitzpatrick J.J., Polyak L., Serreze M.C., White J. Arctic amplification: can the past constrain the future? // Quat. Sci. Rev. 2010. Vol. 29. P. 1779–1790.

Müller J., Werner K., Stein R., Fahl K., Moros M., Jansen E. Holocene cooling culminates in sea ice oscillations in Fram Strait // Quat. Sci. Rev. 2012. Vol. 47. P. 1–14.

Mysak L.A. Patterns of Arctic circulation // Science. 2001. Vol. 293. P. 1269–1270.

Osterman L.E., Poore R.Z., Foley K.M. Distribution of benthic foraminifers (>125 мм) in the surface sediments of the Arctic Ocean // USGS Bulletin. 1999. Vol. 2164. https://doi.org/10.3133/b2164

Ovsepyan Ya.S. Pozdnechetvertichnye foraminifery morya Laptevyh i rekonstruktsii izmeneniya sredy na osnove paleoekologicheskogo analiza [Late Quaternary foraminifera of the Laptev Sea and environmental reconstructions based on palaeoecology proxy] Diss. na soisk. uch. step. k.g.-m.n. M.: 2016. 240 p. (in Russian)

Ovsepyan Ya.S., Taldenkova E.E., Bauch H.A., Kandiano E.S. Rekonstruktsiya sobytii pozdnego pleistotsena–golotsena na kontinental'nom sklone morya Laptevyh po kompleksam bentosnykh i planktonnykh foraminifer [Reconstruction of the Late Pleistocene–Holocene events on the continental slope of the Laptev Sea: evidence from benthic and planktic foraminifera assemblages] // Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya. 2015. Vol. 23. № 6. P. 964–112. (in Russian)

Ovsepyan Ya.S., Taldenkova E.E., Chistyakova N.O., Stepanova A.Yu., Shpielhagen R.F. Pozdnechetvertichnye rekonstruktsii paleoklimata v prolive Frama v kontekste proniknoveniya atlanticheskikh vod v Arktiku [Late Quaternary paleoclimate reconstructions in the Fram Strait region in relation to Atlantic water inflow to the Arctic] // Geologiya morei i okeanov: Materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. M.: IO RAN, 2017. Vol. II. P. 87–90. (in Russian)

Polyak L., Korsun S., Febo L., Stanovoy V., Khusid T., Hald M., Paulsen B.E., Lubinski D.A. Benthic foraminiferal assemblages from the southern Kara Sea, a river-influenced arctic marine environment // J. of Foraminiferal Res. 2002. Vol. 32. № 3. P. 252–273.

Rahmstorf S. Ocean circulation and climate during the past 120 000 Years // Nature. 2002. Vol. 419. P. 207–214.

Rasmussen T.L., Thomsen E., Ньlubowska M.A., Jessen S., Solheim A., Koз N. Paleoceanographic evolution of the SW Svalbard margin (76°N) since 20 000 14C yr BP // Quaternary Research. 2007. Vol. 67. P. 100–114.

Rudels B., Jones E.P., Schauer U., Eriksson P. Atlantic sources of the Arctic Ocean surface and halocline waters // Polar Research. 2004. Vol. 23. P. 181–208.

Salvigsen O., Forman S. L., Miller G. H. Thermophilous molluscs on Svalbard during the Holocene and their paleoclimatic implications // Polar Res. 1992. Vol. 11. P. 1–10.

Seidenkrantz M.-S. Cassidulina teretis Tappan and *Cassidulina neoteretis* new species (Foraminifera): stratigraphic markers for deep sea and outer shelf areas // J. Micropalaeontology. 1995. Vol. 14. P. 145–157.

Serreze M.C., Barry R.G. Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis // Global Planet. Change. 2011. Vol. 77. P. 85–96.

Ślubowska M.A., Koз N., Rasmussen T.L., Klitgaard-Kristensen D. Changes in the flow of Atlantic water into the Arctic Ocean since the last deglaciation: Evidence from the northern Svalbard continental margin, 80°N // Palaeoceanography. 2005. Vol. 20. PA4014.

Spielhagen R.F., Erlenkeuser H., Siegert C. History of freshwater runoff across the Laptev Sea (Arctic) during the last deglaciation // Global Planet. Change. 2005. Vol. 48. P. 187–207.

Steinsund P.I. Benthic foraminifera in the surface sediments of the Barents, Kara Seas: modern and late Quaternary applications // Dissertation. University of Tromsø. 1994.

Taldenkova E., Bauch H.A., Gottschalk J., Nikolaev S., Rostovtseva Yu., Pogodina I., Ovsepyan Ya., Kandiano E. History of ice-rafting and water mass evolution at the northern Siberian continental margin (Laptev Sea) during Late Glacial and Holocene times // Quat. Sci. Rev. 2010. Vol. 29. P. 3919–3935.

Taldenkova E., Bauch H.A., Stepanova A., Ovsepyan Ya., Pogodina I., Klyuvitkina T., Nikolaev S. Benthic community changes at the North Siberian margin in response to Atlantic water mass variability since last deglacial times // Mar. Micropal. 2012. Vol. 96–97. P. 13–28.

Timokhov L.A. Regional characteristics of the Laptev and the East Siberian seas: climate, topography, ice phases, thermohaline regime, circulation // Berichte zur Polarforschung. 1994. Vol. 144. P. 15–31.

Werner K., Müller J., Husum K., Spielhagen R., Kandiano E., Polyak L. Holocene sea subsurface and surface water masses in the Fram Strait – Comparisons of temperature and sea-ice reconstructions // Quat. Sci. Rev. 2016. Vol. 147. P. 194–209.

Wollenburg J., Mackensen A. Living benthic foraminifers from the central Arctic Ocean: faunal composition, standing stock and diversity // Mar. Micropal. 1998. Vol. 34. № 3–4. P. 153–185.

Wollenburg J.E., Knies J., Mackensen A. High-resolution paleoproductivity fluctuations during the past 24 kyr as indicated by benthic foraminifera in the marginal Arctic Ocean // Palaeogeogr. Palaeoclim. Palaeoecol. 2004. Vol. 204. P. 209–238.

Received 26.03.2018
Revised 28.06.2019
Accepted 28.06.2019