

УДК 551.11

## ПРИРОДНЫЕ УСЛОВИЯ В ЦЕНТРЕ НОРВЕЖСКО-ГРЕНЛАНДСКОГО БАССЕЙНА ВО ВРЕМЯ НЕОГЛЯЦИАЦИИ В ПОСЛЕДНИЕ 5 ТЫСЯЧ ЛЕТ

© 2023 г. А. Г. Матуль<sup>1,\*</sup>, Г. Х. Казарина<sup>1</sup>

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 30.08.2022 г.

Поступило 31.08.2022 г.

После доработки 02.09.2022 г.

Принято к публикации 23.09.2022 г.

Сопоставление новых результатов по микропалеонтологии диатомей с имеющимися палеоокеанологическими сведениями по колонке PS1243-2 и глобальными/региональными архивами палеоклимата позволили предположить, что неогляциация в центре Норвежско-Гренландского бассейна у Арктического фронта началась не позднее 4.5 тыс. лет назад. С этого уровня Арктический фронт постепенно приближался к району исследования. Происходило уменьшение влияния смешанной арктическо-норвежской воды, а условия на поверхности становились более контрастными, с усилением признаков арктических или североатлантических (из Норвежского течения) водных масс. Моменты наибольшей контрастности отмечаются при кратковременных потеплениях позднего голоцена.

*Ключевые слова:* палеоокеанология, поздний голоцен, неогляциация, Норвежско-Гренландский бассейн, Арктический фронт

**DOI:** 10.31857/S268673972260179X, **EDN:** GEDIVF

Природные условия субполярной Северной Атлантики, включая Норвежско-Гренландский бассейн, чувствительно и многообразно реагируют на состояние океанской и атмосферной циркуляции в ходе современного глобального потепления. Современные изменения океанологии и осадконакопления в регионе являются продолжением событий похолоданий и потеплений голоцена (последние 11.7 тыс. лет). Во второй половине голоцена после среднеголоценового термического оптимума произошла неогляциация – похолодание 5–2 тыс. лет назад (т.л.н.), при этом в Северной Атлантике оно не имело существенных вариаций, но позднее уровня 2 т.л.н. проявились сильные короткие потепления [17]. Эти изменения позднего голоцена потенциально связаны с атмосферной Северо-Атлантической и океанской Атлантической меридиональной осцилляциями, которые сильно влияли на седиментацию и окружающую среду арктических и субарктических морей атлантического сектора [2]. Исследования показали сложный характер природных событий позднего голоцена в субполярной Северной Атлантике: усиливался температурный контраст между поверхностью моря и

термоклинными слоями [10], могла быть антифазность потеплений и похолоданий в субполярном круговороте открытой СЗ Атлантики и Норвежском море [16]. Таким образом, требуются дальнейшие исследования по детальному надежному описанию палеоокеанологии и палеоклимата позднего голоцена субполярной Северной Атлантики для лучшего понимания прошлых тенденций развития природной среды и их унаследования в современной обстановке.

Реакция на природные изменения последовательно фиксируется в накапливающихся морских отложениях, определяя их вещественный состав. Ассоциации диатомовых водорослей как один из ведущих биогенных компонентов кремнезема в океанских осадках служат инструментом, позволяющим оценить диапазон естественной изменчивости морской среды (температура, соленость, ледовый покров, распространение различных водных масс и др.) при относительно небольших климатических воздействиях. В данной статье мы приводим новую информацию о происходивших при неогляциации климатических изменениях в открытой центральной части Норвежско-Гренландского бассейна по собственным результатам анализа диатомовой флоры в колонке PS1243-2 (рис. 1) в сопоставлении с другими палеоклиматическими данными по этой колонке из разных публикаций и стандартными архивами палеоклимата.

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширинова  
Российской академии наук, Москва, Россия

\*E-mail: amatul@mail.ru

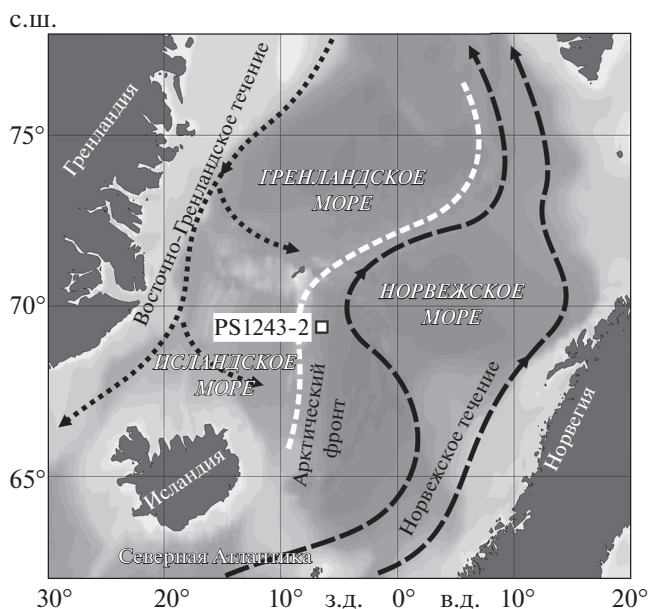


Рис. 1. Карта района исследования.

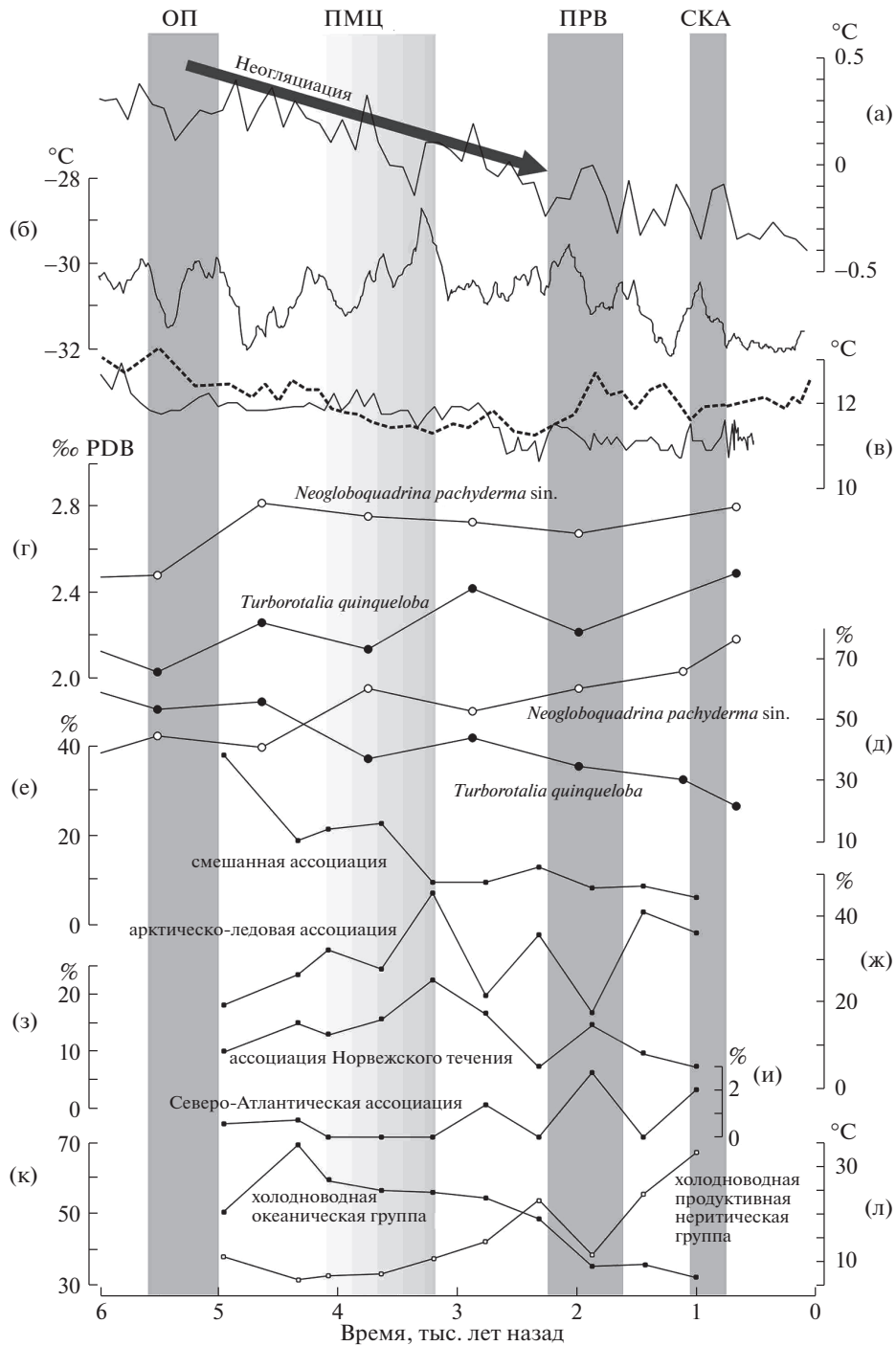
Ранее такого рода сведения в основном получали для приконтинентальных районов, где большие скорости осадконакопления позволяют проводить палеоокеанологические исследования с высоким временным разрешением. Исходя из удобного расположения колонки у Арктического фронта, возможны предположительные выводы о колебаниях его положения и распространении взаимодействующих на фронте различных водных масс (умеренных, арктических и смешанных) в позднем голоцене. Сейчас в районе колонки влияние на местные природные условия оказывают контакт и перемешивание умеренно-теплой воды из западной ветви Норвежского течения и холодной арктической воды из Гренландского моря.

Колонка PS1243-2 (69°22' с.ш., 6°32' з.д., глубина моря 2710 м) содержит терригенные слабокарбонатные алевритово-пелитовые илы. Она имеет надежную возрастную модель и служит стандартным высокоразрешающим палеоокеанологическим архивом североευропейских морей для последних 30 тыс. лет [5]. В рамках научного партнерства Х.А. Баух (Н.А. Bauch) из научного центра GEOMAR, г. Киль, Германия, передал нам для анализа готовые препараты диатомей из верхней части колонки (0–30.5 см), соответствующей голоцену. Препараты сделаны почти полойно по разрезу с интервалом в 1 см и просмотрены под микроскопом по методике, стандартной для диатомового анализа. Обильная и разнообразная диатомовая флора, пригодная для количественного анализа, обнаружена только в самой верхней части разреза в интервале 2–11.5 см,

которая сформировалась 5–1 т.л.н. В целом створки найденных 45 таксонов диатомей слабоокремненные, преимущественно хорошей сохранности, без явных следов растворения, с хорошо различимой тонкой структурой.

Микропалеонтологический анализ предполагает в качестве актуалистической основы палеоокеанологических выводов использование закономерностей, выявленных в распределении диатомей в поверхностном слое осадков. Статистические методы, в частности Q-mode факторный анализ диатомей из осадков субполярной Северной Атлантики, позволили выявить от пяти до восьми ассоциаций диатомовых водорослей, связанных с распространением основных поверхностных водных масс [13]. Из них наиболее значительны следующие: 1) ледовая ассоциация развита в области полярной воды Восточно-Гренландского течения вдоль Гренландии; 2) арктическая ассоциация холодноводных диатомей отмечена к западу от и около Арктического фронта в Гренландском море, на севере и в центре Исландского моря, на крайнем западе Норвежского моря, 3) смешанная ассоциация, еще один вариант холодноводной ассоциации, распространена в центре и на юго-западе Норвежского моря и на востоке Исландского моря в области взаимодействия арктической воды и умеренно-теплых вод Норвежского течения, 4) ассоциация умеренно-теплого Норвежского течения в южной половине Норвежского моря с участием более тепловодных диатомей, 5) Северо-Атлантическая тепловодная ассоциация в самой южной части Норвежского моря к югу от 65° с.ш. В районе колонки PS1243-2 ведущими ассоциациями диатомей в поверхностных осадках являются арктическая (до 60% факторной нагрузки) и смешанная (20–50% факторной нагрузки); факторные нагрузки других ассоциаций остаются <20%.

В интерпретации распределения диатомей мы использовали два способа. В одном способе мы объединяем виды диатомей в ассоциации, выделенные факторным анализом в [13] (см. предыдущий абзац). В совместную ледово-арктическую ассоциацию вошли *Fragilariopsis cylindrus*, *Porosira glacialis*, *Thalassiosira hyalina*, *Th. antarctica* var. *borealis*, *Rhizosolenia hebetata semispina*, *Shionodiscus trifultus*). В смешанную холодноводную ассоциацию (контакт арктической воды из Гренландского моря и умеренной воды из Норвежского течения) вошли *Rhizosolenia hebetata semispina*, *Rh. styliformis*, *Thalassiotrix longissima*. В умеренно-тепловодную ассоциацию Норвежского течения вошли *Thalassionema nitzschioides*, *Rh. styliformis*, *Thalassiosira angulata*, *Coscinodocus radiatus*. В Северо-Атлантическую ассоциацию вошли *Shionodiscus oestrupii* и *Roperia tessellata*. Суммарное содержание видов в ассоциациях мы рассматриваем как признак влияния того или иного типа водных



**Рис. 2.** Глобальные/региональные архивы палеоклимата за последние 6 тыс. лет и распределение ассоциаций диатомей в колонке PS1243-2: (а) среднегодовая приземная температура воздуха в северном полушарии в зоне 60–90°с.ш. [12], (б) среднегодовая приземная температура воздуха в центральной Гренландии [3], (в) среднегодовая температура поверхностной воды в Норвежском море (сплошная линия) по [8] и температура поверхностной воды в августе на севере Исландской котловины у южной Исландии (пунктирная линия) по [17], (г) распределение  $\delta^{18}\text{O}$  в раковинах планктонных фораминифер из колонки PS1243-2 по [4], (д) распределение видов планктонных фораминифер в колонке PS1243-2 по [11], (е) суммарное содержание основных видов диатомей из смешанной ассоциации, (ж) суммарное содержание основных видов диатомей из ледово-арктической ассоциации, (з) суммарное содержание основных видов диатомей из ассоциации Норвежского течения, (и) суммарное содержание основных видов диатомей из Северо-Атлантической ассоциации, (к) суммарное содержание группы холодноводных неритических продуктивных диатомей (черные кружки), (л) суммарное содержание группы холодноводных океанических диатомей (белые кружки). Серые вертикальные полосы обозначают палеоклиматические интервалы: ОП – холодная осцилляция Пиора по [18], ПМЦ – потепление Минийской цивилизации по [1], ПРВ – потепление Римских веков по [14], СКА – Средневековая климатическая аномалия по [14]. Тренд к похолоданию при неогляциации (наклонная темно-серая стрелка) обозначен по [7].

масс. В другом способе выделение характерных групп диатомей соответствует подходу, примененному нами при анализе палеоокеанологии позднего голоцена в проливе Фрама [15]: объединение видов в две основные группы – холодноводных океанических (*Actinocyclus curvatulus*, *Rhizosolenia hebetata hebetata*, *Rh. hebetata semispina*, *Shionodiscus trifultus*, *Thalassiosira angulata*) и холодноводных продуктивных неритических (*Coscinodiscus marginatus*, *Thalassiosira anguste-lineata*, *Th. excentrica*, *Th. antarctica* var. *borealis*, *Th. pacifica*, *Chaetoceros* spp.).

В колонке PS1243-2 начало неогляциации по разным данным проявляется в интервале 5.5–4.5 т.л.н. (рис. 2). В изотопно-кислородных записях по раковинам планктонных фораминифер [4] произошло существенное “утяжеление”  $\delta^{18}\text{O}$  на 0.34‰ для *Neoglobobulimina pachyderma* sin. и на 0.23‰ для *Turborotalia quinqueloba* (рис. 2 г), что соответствует понижению температуры подповерхностной воды на 1.5°C, исходя из стандартного соотношения “изменение  $\delta^{18}\text{O}$  на 0.22‰  $\approx$  изменение температуры на 1°C” [6]. Чуть позднее, с уровня 4.5 т.л.н. постоянно растет концентрация полярного вида планктонных фораминифер *N. pachyderma* sin. и падает содержание субполярного вида *T. quinqueloba* [11] (рис. 2 д), причем после уровня 1 т.л.н. доля *N. pachyderma* sin. достигает >70%, что четко указывает на соседнее положение Арктического фронта [9]. Судя по нашим данным о диатомеях, на поверхности моря условия стали меняться также около 4.5 т.л.н. Главное изменение – резкое падение содержания смешанной (арктическо-норвежской) ассоциации (рис. 2 е), в которой преимущество имели виды океанической холодноводной группы. Одновременно растут концентрации арктическо-ледовой ассоциации и умеренно-тепловодной ассоциации Норвежского течения. По нашему мнению, такие изменения могут указывать на усиление контрастов у приближавшегося Арктического фронта.

После уровня около 3 т.л.н. на поверхности моря отмечается неустойчивость во влиянии разных водных масс: происходят резкие и мало согласованные колебания в содержании разных ассоциаций диатомей. Но, в целом, неуклонное усиление роли холодноводной продуктивной группы диатомей от 35–40 до более 60% (рис. 2 к), подобно росту содержания полярного вида фораминифер *N. pachyderma* sin., указывает на все более близкое расположение Арктического фронта как зоны высокой биопродуктивности.

Палеоокеанологические данные из колонки PS1243-2 хорошо согласуются с глобальными и региональными архивами палеоклимата о начале и ходе неогляциации. Холодная осцилляция Пiora (Piora) 5.6–5 т.л.н. как старт неогляциации отражена в палеотемпературе у поверхности Зем-

ли в поясе 60–90°с.ш. [12], в снижении температуры поверхностной североатлантической воды, поступающей в Норвежское море [8, 17], в появлении глубоких минимумов температуры воздуха в центре Гренландии [3] (рис. 2 а–в). Нестабильность условий на поверхности моря в районе колонки PS1243-2, на наш взгляд, проявилась из-за ряда потеплений: конец потепления Минойской цивилизации (ПМЦ), потепление Римских веков (ПРВ), Средневековая климатическая аномалия (СКА). Возможно, Арктический фронт в эти моменты оставался близким к современному положению, но кратковременно усиливалось влияние умеренно-теплой воды Норвежского течения – в конце ПМЦ 3.2 т.л.н. и в ПРВ 1.8 т.л.н., а также теплой воды из открытой Северной Атлантики – в ПРВ 1.8 т.л.н. и СКА 1 т.л.н. Упомянутая выше большая контрастность у Арктического фронта могла быть сильнее выражена, судя по увеличению роли ледово-арктической ассоциации диатомей, в конце ПМЦ и в СКА.

По нашим новым данным о микропалеонтологии позднеголоценовых осадков в сопоставлении с опубликованными палеоклиматическими сведениями, неогляциация в центре Норвежско-Гренландского бассейна на контакте арктической и североатлантической воды у Арктического фронта проявилась на поверхности моря не позднее 4.5 т.л.н. Общий тренд неогляциации в данном районе – приближение Арктического фронта и уменьшение влияния смешанной арктическо-норвежской воды. Условия на поверхности становились более контрастными, с попеременным или, в отдельные моменты, одновременным усилением притока арктической или североатлантической (из Норвежского течения) воды. Контрастность могла увеличиваться во время кратковременных потеплений позднего голоцена.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят д-ра Х.А. Бауха из научного центра GEOMAR, г. Киль, Германия за предоставление препаратов диатомей для микропалеонтологического анализа.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Статья подготовлена за счет средств Российского научного фонда, проект № 21-17-00235, при дополнительной поддержке по Госзаданию Минобрнауки № FMWE-2021-0006 (лабораторный анализ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев Ю.В. От Евразии к Европе: Крит и Эгейский мир в эпоху бронзы и раннего железа (III – нач. I тысячелетия до н.э.). СПб.: Дмитрий Буланин, 2002. 864 с.

2. Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р. Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М.: ГЕОС, 2007. 400 с.
3. Alley R.B. NOAA/WDS Paleoclimatology – GISP2 – Temperature Reconstruction and Accumulation Data. NOAA National Centers for Environmental Information. 2004. <https://doi.org/10.25921/36sb-3355>. Accessed [20–08–2022].
4. Bauch D., Darling K.F., Simstich J., Bauch H.A., Erlenkeuser H., Kroon D. Foraminifera isotopes of sediment core PS1243-2. PANGAEA. 2002. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.82369>. Accessed [20–08–2022].
5. Bauch H.A., Erlenkeuser H., Spielhagen R.F., Struck U., Matthiessen J., Thiede J., Heinemeier J. A multiproxy reconstruction of the evolution of deep and surface waters in the subarctic Nordic seas over the last 30 000 yr // *Quaternary Science Reviews*. 2001. V. 20. P. 659–678.
6. Bemis B.E., Spero H.J., Bjima J., Lea D.W. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations // *Paleoceanography*. 1998. V. 13. P. 150–160.
7. Briner J.P., McKay N.P., Axford Y., Bennike O., Bradley R.S., de Vernal A., Fisher D., Francus P., Fréchette B., Gajewski K.J., Jennings A., Kaufman D.S., Miller G., Rouston C., Wagner B. Holocene climate change in Arctic Canada and Greenland // *Quaternary Science Reviews*. 2016. V. 147. P. 340–364.
8. Calvo E., Grimalt J., Jansen E. High resolution U37K sea surface temperature reconstruction in the Norwegian Sea during the Holocene // *Quaternary Science Reviews*. 2002. V. 21. № 12–13. P. 1385–1394.
9. Eynaud F. Planktonic foraminifera in the Arctic: potentials and issues regarding modern and Quaternary populations // *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*. 2011. Article 14 012005.
10. Farmer E.J., Chapman M.R., Andrews J.E. Holocene temperature evolution of the subpolar North Atlantic recorded in the Mg/Ca ratios of surface and thermocline dwelling planktonic foraminifers // *Global and Planetary Change*. 2011. V. 79. P. 234–243.
11. Kandiano E.S. Foraminiferal census data of sediment core PS1243-2 during marine isotopic stage 1–3 (125–250 Bpm). PANGAEA. 2009. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.713749>. Accessed [20–08–2022].
12. Kaufman D., McKay N., Rouston C., Erb M., Dätwyler C., Sommer P., Heiri O., Davis B. Holocene global mean surface temperature, a multi-method reconstruction approach // *Scientific Data*. 2020. V. 7 (1): 201.
13. Koc Karpuz N., Schrader H. Surface sediment diatom distribution and Holocene paleotemperature variations in the Greenland, Iceland and Norwegian Sea // *Paleoceanography*. 1990. V. 5. P. 557–580.
14. Mann M., Zhang Z., Rutherford S., Bradley R.S., Hughes M.K., Shindell D., Ammann C., Faluvegi G., Ni F. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly // *Science*. 2009. V. 326. P. 1256–1260.
15. Matul A., Spielhagen R.F., Kazarina G., Kruglikova S., Dmitrenko O., Mohan R. Warm-water events in the Fram Strait during the last 2000 years as revealed by different microfossil groups // *Polar Research*. 2018. V. 37. Article 1540243.
16. Miettinen A., Divine D., Koç N., Godtliobsen F., Hall I.R. Multicentennial variability of the sea surface temperature gradient across the subpolar North Atlantic over the last 2.8 kyr // *Journal of Climate*. 2012. V. 25. P. 4205–4219.
17. Orme L.C., Miettinen A., Divine D.V., Husum K., Pearce C., Van Nieuwenhove N., Born A., Mohan R., Seidenkrantz M.-S. Subpolar North Atlantic Sea surface temperature since 6 ka BP: Indications of anomalous ocean-atmosphere interactions at 4–2 ka BP // *Quaternary Science Reviews*. 2018. V. 194. P. 128–142.
18. Seifert J., Lemke F. Climate Pattern Recognition in the Mid-Holocene (4800 BC to 2800 BC, Part 3). 2015. [http://www.knowledgeminer.eu/climate\\_papers.html](http://www.knowledgeminer.eu/climate_papers.html). Accessed [20–08–2022].

## ENVIRONMENTS IN THE CENTRAL NORWEGIAN-GREENLAND BASIN DURING NEGLACIATION IN THE LAST 5 THOUSAND YEARS

A. G. Matul<sup>a,#</sup> and G. Kh. Kazarina<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Shishov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>#</sup> E-mail: amatul@mail.ru

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovsky August 30, 2022

A comparison of the new results on diatom micropaleontology with the available paleoceanological data on core PS1243-2 and global/regional paleoclimate archives made it possible to assume that neoglaciation in the central Norwegian-Greenland Basin near the Arctic front began no later than 4500 years ago. From this level, the Arctic front gradually approached the study area. There was a decrease in the influence of the mixed Arctic-Norwegian water, and the conditions on the surface became more contrasting, with an increase in signs of Arctic or North Atlantic (from the Norwegian Current) water. The moments of the greatest contrast are noted during short-term warmings of the Late Holocene.

**Keywords:** paleoceanology, late Holocene, Neoglaciation, Norwegian-Greenland Basin, Arctic front