

УДК 551.461.8

ПРИРОДНАЯ СРЕДА НОРВЕЖСКОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ИСКОПАЕМЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ

© 2023 г. Т. С. Ключевиткина^{1,*}, Е. А. Новичкова², А. Г. Матуль², М. Д. Кравчишина²

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 19.07.2023 г.

Поступило 09.07.2023 г.

После доработки 04.08.2023 г.

Принято к публикации 04.08.2023 г.

Получены новые результаты детального микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6142, отобранной в глубоководной юго-западной части Лофотенской котловины Норвежского моря. По данным анализа цист динофлагеллят методом современных аналогов реконструированы значения летней температуры поверхностной воды за последние 7 тыс. лет. Состав ассоциаций микрофоссилий и результаты реконструкций указывают на неоднократную смену морских природных условий в фотическом слое воды во время накопления осадков в среднем и позднем голоцене. Эпизоды похолодания и вероятного смещения Арктического фронта в юго-западную часть Лофотенской котловины отмечены для интервалов 5–7, 1.6–2.1 и 0.1–1.0 тыс. лет назад.

Ключевые слова: Северная Атлантика, палеореконструкции, цисты динофлагеллят, Арктический фронт

DOI: 10.31857/S2686739723601631, **EDN:** UOCFKF

ВВЕДЕНИЕ

В условиях современного потепления и увеличения потока теплой атлантической воды в Арктику необходимо понимать, как функционировала климатическая система в прошлом и как ее изменения влияли на окружающую среду. Особенно важно изучение кратковременных климатических событий последних тысячелетий. Ключевым регионом для понимания закономерностей формирования климата Северного полушария считается Норвежско-Гренландский бассейн. Здесь находится зона контакта холодной полярной воды, поступающей из Северного Ледовитого океана на юг вдоль восточного побережья Гренландии, и теплых и соленых вод Норвежского течения, следующего из Атлантического океана в Арктику [2] (рис. 1). В этом регионе располагаются Полярный и Арктический фронты, которые в недавнем геологическом прошлом неоднократно ме-

няли свое положение, реагируя на изменения глобального и регионального климата.

Одним из надежных способов восстановить характер изменений морской среды и климата считаются микропалеонтологические методы. Среди них важную роль играет анализ микроводорослей и, в их числе, органотенных цист динофлагеллят (диноцист). Они широко распространены в Арктике и Северной Атлантике (динофлагелляты относятся к одним из основных компонентов морского фитопланктона) и, в отличие от многих других микроорганизмов, хорошо сохраняются в донных осадках. С помощью анализа диноцист можно реконструировать температуру и соленость морской поверхностной воды, продуктивность и распространение водных масс, ледовые условия и др. [9, 14].

Современные микропалеонтологические исследования позднеплейстоценовых и голоценовых осадков в Норвежско-Гренландском бассейне ведутся, в основном, в шельфовых областях, на плато или в районах континентальной окраины, т.е. в зонах относительно быстрой седиментации (например, [3, 4, 16] и др.). Центральная глубоководная часть Норвежского моря, где скорости осадконакопления невысокие, в настоящее время исследована в меньшей степени, а количествен-

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: t.klyuvitkina@mail.ru

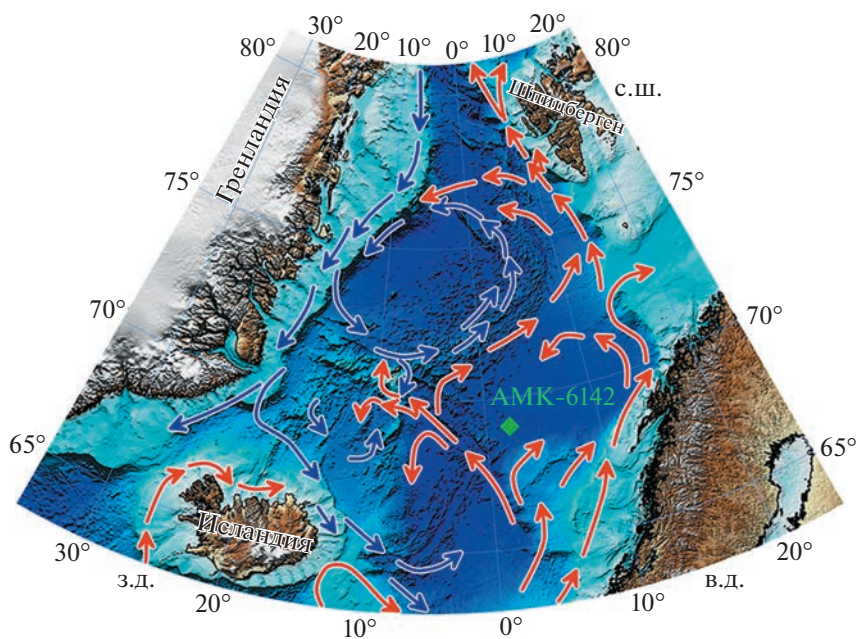


Рис. 1. Местоположение колонки АМК-6142 в Норвежском море. Красными и синими стрелками показаны теплые и холодные поверхностные течения соответственно [5].

ные реконструкции палеоокеанологических параметров поверхностной воды здесь отсутствуют.

В статье представлены новые результаты детального микропалеонтологического анализа колонки голоценовых донных осадков из Лофотенской котловины Норвежского моря. Колонка находится на удалении от зон прямого влияния подводных оползней, а также от устьев подводных желобов и каньонов [18], следовательно, хемипелагическое осадконакопление здесь может считаться ненарушенным. Точка пробоотбора лежит под западной ветвью Норвежского течения, но при этом в близости к Арктическому фронту, поэтому любые климатические колебания здесь хорошо отражаются в ассоциациях микроорганизмов. По данным их анализа реконструированы основные этапы развития природной среды Лофотенской котловины в среднем и позднем голоцене, а также впервые восстановлены количественные значения палеотемпературы поверхностных вод.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Колонка АМК-6142 (69°02.674' с.ш., 02°06.611' в.д.) длиной 29 см получена с помощью мультикорера Mini Muc K/MT 410 в 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2019 г.) в Норвежском море, в глубоководной юго-западной части Лофотенской котловины с глубины моря 3181 м [1] (см. рис. 1).

Осадки колонки АМК-6142 представлены, в основном, пелитовым илом коричневых оттенков с многочисленными включениями раковин фораминифер. По разрезу колонки методом ускорительной масс-спектрометрии ^{14}C в Пекинском университете (Китай) получены четыре радиоуглеродные датировки раковин планктонных фораминифер *Neogloboquadrina pachyderma* (sin.) (не менее 2500 экз. для одной пробы). Радиоуглеродный возраст калиброван в календарный в программе CALIB 8.2 (кривая IntCal20) с учетом поправки на резервуарный эффект —405 лет [13, 15]. Осадки колонки сформировались за последние примерно 7 тыс. календарных лет (с учетом экстраполяции по ^{14}C -датировкам) и характеризуют условия среднего и позднего голоцена.

Образцы для целей анализа микроводорослей отбирались с интервалом 1 см. Всего изучено 30 образцов. Химическая обработка проб выполнена в Институте океанологии имени П.П. Ширшова РАН по стандартной методике [6]. Для растворения карбонатного и силикатного вещества в осадках использовались соляная (HCl) и плавиковая (HF) кислоты. Для удаления из образцов пелитовых частиц препараты фильтровались через сито с диаметром пор 7–10 мкм. Исследования ассоциаций микроводорослей проводились под световым микроскопом с увеличением $\times 400$ и $\times 1000$ с использованием новейших определителей ([17, 20] и др.). В каждом образце было идентифицировано как минимум 300 цист динофлагеллят.

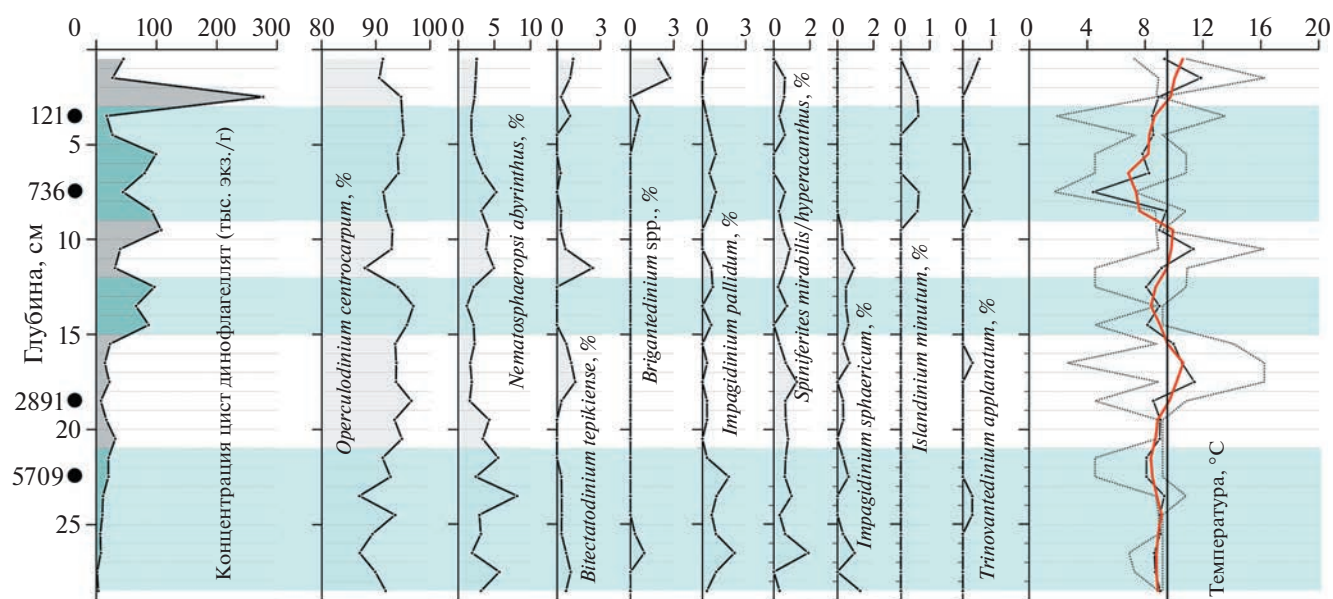


Рис. 2. Результаты микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6142: общая концентрация, распределение индикаторных видов цист динофлагеллят и реконструированная летняя температура поверхностной воды. Черными кружками слева от оси ординат обозначен календарный возраст (лет назад) образцов, для которых получены радиоуглеродные датировки. На графике температуры сплошной черной линией показаны реконструированные значения, красной линией — скользящее среднее ($n = 3$), пунктирными черными линиями ограничен доверительный интервал. Вертикальная линия показывает современную среднюю летнюю температуру поверхностных вод в точке отбора колонки ($\sim 9.5^\circ\text{C}$). Голубым цветом выделены вероятные интервалы похолоданий поверхностного слоя воды.

По материалам анализа диноцист в колонке АМК-6142 реконструированы количественные значения летней температуры поверхностного слоя воды ($^\circ\text{C}$). Палеорекострукции выполнены методом современных аналогов (Modern Analogue Technic — MAT) [8, 9, 11] с использованием пакета программного обеспечения bioindic для языка программирования R и базы данных диноцист 2020 г. (1968 проб) [8]. Для оценки надежности реконструкций применена методика кодов достоверности, учитывающая для каждого образца число подсчитанных в препарате диноцист, сходство с найденными аналогами и количество наиболее близких из них [7]. Коды, рассчитанные таким образом, ранжируются от А для наиболее надежных оценок до D для реконструкций, основанных на малом количестве диноцист и/или неудачных аналогах [16]. Результаты реконструкций для всех образцов колонки АМК-6142 попали в категорию А.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации цист динофлагеллят в осадках колонки АМК-6142 варьируют от 1.5 до 277 тыс./г сухого осадка (рис. 2). Все встреченные виды отличались хорошей сохранностью, что особенно важно для оценки достоверности палеорекострукций, выполняемых по микропалеонтологическим данным. В нижней части колонки, на глу-

бинах более 25 см, содержание диноцист минимально, вверх по разрезу оно увеличивается, резко возрастает на глубине 15 см, а в интервале 0–15 см достигает максимальных значений (пик отмечается на уровне 2–3 см). Кроме диноцист, в некоторых пробах встречены единичные пресноводные зеленые водоросли *Botryococcus*, пыльца наземных растений, а также органические остатки скелетов фораминифер.

Цисты динофлагеллят представлены 16 видами и видовыми группами. Преобладают виды, характерные для послеледниковых и голоценовых осадков Западной Арктики и Северной Атлантики ([14, 19] и др.). Более 85% в составе ассоциаций во всех пробах занимает *Operculodinium centrocarpum*, типичный вид для северо-восточной части Атлантического океана и Норвежского моря, считающийся индикатором атлантических водных масс. Кроме него, заметную роль в ассоциациях играют *Nematosphaeropsis labyrinthus* (до 8.1%), *Brigantedinium* spp. (до 2.7%), *Bityectatodinium tepikiense* (до 2.5%), *Impagidinium pallidum* (до 2.2%), *Spiniferites mirabilis/hyperacanthus* (до 1.9%), *S. ramosus* (до 1.9%), *Impagidinium sphaericum* (до 1.3%) и *Spiniferites elongatus* (до 1.0%). Также единично ($<1\%$) встречаются *Islandinium minutum*, *Trinovantedinium applanatum* и цисты *Pen-tapharsodinium dalei*.

Результаты количественных реконструкций показывают, что за время накопления осадков

колонки летняя температура поверхностной воды в данной точке варьировала от 4.4 до 11.8°C, оставаясь в среднем близкой к современному значению ~9.5°C [12]. В целом по результатам анализа диноцист в колонке АМК-6142 можно заключить, что в течение последних 7 тыс. лет палеоокеанологические условия в фотическом слое Лофотенской котловины были относительно стабильны, однако за это время выделяется несколько коротких смен обстановок осадконакопления.

В нижней части колонки, в интервале 21–29 см (около 5–7 тыс. лет назад (т.л.н.)), в составе ассоциаций максимального обилия достигает *I. pallidum*. Этот вид характерен для холодных, но при этом соленых вод полярной и субполярной зоны [8]. В современных осадках он широко распространен в высоких широтах, в частности, в ассоциациях диноцист Гренландского моря [14], а также в зоне Полярного фронта [19]. Повышение его содержания в осадках может указывать на эпизоды похолоданий и/или приближения фронта. Реконструированная температура поверхностных вод в данном интервале остается относительно низкой (не превышает 8.1°C).

Осадки в интервале 18–21 см (~2.8–5.0 т.л.н.) формировались, судя по составу комплексов диноцист и реконструированной температуре поверхностных вод (в среднем 8.9°C), в условиях, близких к современным.

В интервале 15–18 см (~2.1–2.8 т.л.н.) в ассоциациях микроводорослей повышается суммарная доля *B. tepikiense* и *S. mirabilis/hyperacanthus*, а также появляется *T. applanatum*. Эти виды можно считать тепловодными индикаторами для Норвежско-Гренландского бассейна. Так, *S. mirabilis/hyperacanthus* широко распространен в умеренных и экваториальных районах Атлантики [19]. Температура поверхностного слоя воды в этом интервале возрастает до 11.4°C, что почти на 2°C выше современной.

В интервале 12–15 см (~1.6–2.1 т.л.н.) температура снижается до 8.1°C. Это сопровождается уменьшением суммарной доли тепловодных видов, в частности, отсутствием *B. tepikiense*. На нижней границе этого интервала происходит скачкообразное увеличение суммарной концентрации диноцист. Похожий эпизод позднеголоценового похолодания отмечен для плато Воринг [16].

Осадки в интервале 9–12 см (~1.0–1.6 т.л.н.) характеризуются максимальной суммарной долей видов, характерных для южных умеренных районов Атлантики, а число холодноводных диноцист снижается и не превышает 1%. Наибольших значений достигает содержание *B. tepikiense*. Также заметен вклад *I. sphaericum* и *S. mirabilis/hyperacanthus*. Температуры поверхностных вод поднимаются до 11.3°C. Вероятно, это указывает

на эпизод перераспределения поверхностных водных масс, связанный с усилением влияния теплого течения.

В интервале 3–9 см (~0.1–1.0 т.л.н.) происходит самое заметное снижение реконструированных температур, они опускались до 4.4°C, а в среднем по интервалу составляли всего 7.8°C. До минимума снижается содержание *B. tepikiense*, возрастает доля *I. pallidum*, появляется *Brigantedinium* spp. В этом интервале в осадках колонки встречается *I. minutum* – самый распространенный вид в осадках шельфовых морей Северного Ледовитого океана. В районах, где температура поверхностных вод зимой опускается ниже 0°C, а летом остается ниже 5°C, *I. minutum* обычно отмечается в количествах свыше 10% [19]. *I. minutum* и *Brigantedinium* spp. широко распространены в современных осадках вдоль восточного побережья Гренландии, а также во фьордах Шпицбергена [10, 19]. Данный интервал, предположительно, может соответствовать Малому ледниковому периоду.

В самом верхнем, коротком интервале 0–3 см (последние ~100 лет) отмечается пик концентраций диноцист. Здесь присутствуют как *B. tepikiense*, *S. mirabilis/hyperacanthus* и *T. applanatum*, так и *I. minutum* и *Brigantedinium* spp. Реконструированная по диноцистам температура достигает 11.9°C.

ВЫВОДЫ

Новые результаты детального микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6142 и впервые выполненные по ним количественные палеорекострукции позволили описать природные условия фотической зоны Лофотенской котловины в среднем и позднем голоцене. Установлено, что

- на протяжении последних 7 тыс. лет в юго-западной части Лофотенской котловины стабильно и постоянно присутствовали североатлантические водные массы;

- температуры поверхностных вод за последние 7 тыс. лет в целом были близки к современным, однако эпизоды похолодания и предполагаемого приближения зоны Арктического фронта к точке пробоотбора были возможны 5–7 и 1.6–2.1 т.л.н., а также в интервале 0.1–1.0 т.л.н., который, предположительно, соответствует Малому ледниковому периоду;

- примерно 2.1–2.8 и 1.0–1.6 т.л.н. осадки накапливались, вероятно, при некотором усилении влияния более теплых вод Норвежского течения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш”, Г.В. Малафееву, С.М. Исаченко и Д.Ф. Будько за помощь в отборе проб осадков, А.А. Ключиткину за всестороннее содействие и Е.А. Агафоновой за лабораторную обработку проб. Особую благодарность мы выражаем профессору Липину Чжоу (Liping Zhou) за работу по датированию осадков колонки.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по гранту РНФ № 21-17-00235 при дополнительной поддержке по теме госзаданий Минобрнауки № FMWE-2021-0006 (отбор проб осадков в экспедициях ИО РАН) и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова № 121051100135-0 (микроскопные исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Немировская И.А. и др. Исследование седиментосистем Европейской Арктики в 75-м рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” // *Океанология*. 2020. Т. 60 (3). С. 485–487. <https://doi.org/10.31857/S003015742003003X>
2. Ланно С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // *Исследования процессов взаимодействия океана и атмосферы*. М.: Моск. Отд. Гидрометеоздата, 1984. С. 125–129.
3. Bauch H.A., Erlenkeuser H., Spielhagen R.F., et al. 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.
4. Baumann K.-H., Matthiessen J. Variations in surface water mass conditions in the Norwegian Sea: Evidence from Holocene coccolith and dinoflagellate cyst assemblages // *Marine Micropaleontology*. 1992. V. 20. P. 129–146.
5. Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s // *ICES Journal of Marine Science*. 2004. V. 61. P. 846–863.
6. de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological preparation techniques and analyses. Notes prepared for students of course SCT 8245, Département des Sciences de la Terre, UQAM, Montréal // *Les Cahiers du GEOTOP*. 2010. No. 3. 32 p.
7. de Vernal A., Hillaire-Marcel C., Rochon A., et al. Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas // *Quaternary Science Reviews*. 2013. V. 79. P. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.07.006>
8. de Vernal A., Radi T., Zaragosi S., et al. Distribution of common modern dinoflagellate cyst taxa in surface sediments of the Northern Hemisphere in relation to environmental parameters: The new n = 1968 database // *Marine Micropaleontology*. 2020. V. 159. P. 101796. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101796>
9. de Vernal A., Rochon A., Fréchette B., et al. Reconstructing past sea ice cover of the Northern Hemisphere from dinocyst assemblages: Status of the approach // *Quaternary Science Reviews*. 2013. V. 79. P. 122–134. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.06.022>
10. Grøsfjeld K., Harland R., Howe J. Dinoflagellate cyst assemblages inshore and offshore Svalbard reflecting their modern hydrography and climate // *Norw. J. of Geol.* 2009. V. 89. P. 121–134.
11. Guiot J., de Vernal A. Transfer functions: Methods for quantitative paleoceanography based on microfossils / Proxies in Late Cenozoic Paleocyanography. Hillaire-Marcel C., de Vernal A. (eds.). Amsterdam: Elsevier Science, 2007. P. 523–563. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01018-4](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01018-4)
12. Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., et al. World Ocean Atlas 2013, Volume 1: Temperature / NOAA Atlas NESDIS. 2013. V. 73. 40 p. <https://doi.org/10.7289/V55X26VD>
13. Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. The INTCAL20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0–55 cal kBP) // *Radiocarbon*. 2020. V. 62(4). <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
14. Rochon A., de Vernal A., Turon J.-L., et al. Recent dinoflagellate cysts of the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters // *AASP Contribution Series*. 1999. V. 35. P. 1–146.
15. Stuiver M., Reimer P.J. Extended ¹⁴C data base and revised CALIB 3.0 ¹⁴C age calibration program (CALIB rev. 8) // *Radiocarbon*. 1993. V. 35. P. 215–230.
16. Van Nieuwenhove N., Baumann A., Matthiessen J., et al. Sea surface conditions in the southern Nordic Seas during the Holocene based on dinoflagellate cyst assemblages // *The Holocene*. 2016. V. 26 (5). P. 722–735.
17. Van Nieuwenhove N., Head M.J., Limoges A. An overview and brief description of common marine organic-walled dinoflagellate cyst taxa occurring in surface sediments of the Northern Hemisphere // *Marine Micropaleontology*. 2020. V. 159. P. 101814. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2019.101814>
18. Vorren T.O., Laberg J.S., Blaume F. The Norwegian-Greenland Sea continental margins: morphology and Late Quaternary sedimentary processes and environment // *Quaternary Science Reviews*. 1998. V. 17. P. 273–302.
19. Zonneveld K.A.F., Marret F., Versteegh G.J.M., et al. Atlas of modern dinoflagellate cyst distribution based on 2405 data points // *Review of Palaeobotany and Palynology*. 2013. V. 191. P. 1–197.
20. Zonneveld K.A.F., Pospelova V. A determination key for modern dinoflagellate cysts // *Palynology*. 2015. V. 39 (3). P. 387–409.

NORWEGIAN SEA HOLOCENE ENVIRONMENTS BASED ON THE FOSSIL MICROALGAE ASSEMBLAGES

T. S. Klyuvitkina^{a,#}, E. A. Novichkova^b, A. G. Matul^b, and M. D. Kravchishina^b

^a*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

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

[#]*E-mail: t.klyuvitkina@mail.ru*

Presented by Academician of the RAS L.I. Lobkovskiy July 19, 2023

Detailed micropaleontological analysis was performed on the sediment core AMK-6142 collected in the deep-sea southwestern part of the Lofoten Basin in the Norwegian Sea. Summer sea-surface temperature for the last 7 cal. ky was reconstructed from dinocyst assemblages using the modern analogue technique (MAT). Sea-surface temperature reconstruction and dinocysts species composition indicate repeated changes in the surface environments during the Middle and Late Holocene. Episodes of cooling and probable displacement of the Arctic Front to the southwestern part of the Lofoten Basin were recorded for 5–7, 1.6–2.1, and 0.1–1.0 cal. ka BP.

Keywords: North Atlantic, paleoreconstructions, dinoflagellate cysts, Arctic Front