

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.461.8

УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В РАЙОНЕ ХРЕБТА КНИПОВИЧА (НОРВЕЖСКОЕ МОРЕ) В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА МИКРОФОССИЛИЙ

Т.С. Ключевиткина¹, Е.А. Агафонова², Е.А. Новичкова³, Л.А. Лозинская⁴,
М.П. Чеховская⁵, А.Г. Матуль⁶, М.Д. Кравчишина⁷

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория новейших отложений и палеогеографии плейстоцена*

^{2,3,7} *Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН,*

лаборатория физико-геологических исследований имени А.П. Лисицына

⁴⁻⁶ *Институт океанологии имени П.П. Шириова РАН, лаборатория палеоэкологии и биостратиграфии*

¹ *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru*

² *Науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: agafonovaelizaveta@mail.ru*

³ *Вед. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: enovichkova@mail.ru*

⁴ *Мл. науч. сотр.; e-mail: boda11@yandex.ru*

⁵ *Ст. науч. сотр.; e-mail: mjach47@mail.ru*

⁶ *Гл. науч. сотр., зав. лаб., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: amatul@mail.ru*

⁷ *Вед. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kravchishina@ocean.ru*

Выполнена реконструкция климатических событий последних тысячелетий в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по данным микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6150. Получены новые результаты анализов цист динофлагеллят, диатомовых водорослей, а также бентосных и планктонных фораминифер, позволившие сделать выводы о времени накопления осадков и о природных условиях, господствовавших в то время. Согласно предварительным данным о климатостратиграфии по составу ископаемых микрофоссилий, установлено, что период формирования осадков колонки АМК-6150 не превышает 7000 лет. Состав ассоциаций микрофоссилий и результаты реконструкций указывают на неоднократные смены морских природных условий за это время. На глубине 23–24 см в осадках зафиксировано начало существенного повышения температуры и солёности поверхностных вод за счет возможного усиления влияния Норвежского течения. Согласно видовому и количественному составу ассоциаций диноцист и диатомей, осадки в коротком интервале глубин 14–12 см накапливались в период заметного снижения температуры и усиления влияния арктических водных масс. По данным анализа диноцист методом современных аналогов реконструированы количественные значения летних палеотемператур поверхностных вод и продолжительности ледового покрова. Установлено, что эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

Ключевые слова: Северная Атлантика, морская геология, палеореконструкции, диатомовые водоросли, цисты динофлагеллят, фораминиферы

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.6.11

ВВЕДЕНИЕ

Норвежско-Гренландский регион играет ключевую роль в формировании климата всего Северного полушария. Через пролив Фрама идет постоянный водообмен: на юг с Восточно-Гренландским течением выносятся холодные полярные водные массы, а на север с Норвежским поступают относительно теплые и соленые воды, которые погружаются под холодные и распространяются в арктические моря вдоль континентального склона

Евразии. В этом регионе проходят Полярный и Арктический фронты, которые в недавнем геологическом прошлом неоднократно меняли свое положение, реагируя на изменения глобального климата. Следовательно, для понимания современных климатических процессов, происходящих в океане, необходим детальный анализ изменений морских природных условий в прошлом. Особенно важно изучение кратковременных климатических событий последних тысячелетий.

Одним из самых точных способов восстановить характер изменений морской среды и климата считаются микропалеонтологические методы. Среди них важную роль играет анализ микроводорослей и в их числе органостенных цист динофлагеллят (диноцист) и диатомовых водорослей, а также планктонных и бентосных фораминифер. С помощью этих микроорганизмов можно реконструировать температуру и соленость морских поверхностных вод, их продуктивность, распространение водных масс и ледовые условия.

В работе представлены новые результаты комплексного микропалеонтологического анализа осадков колонки АМК-6150, полученной в Норвежском море у восточного подножья срединно-океанического хр. Книповича. Колонка получена в глубоководной зоне, в области низких скоростей осадконакопления. Современные же микропалеонтологические исследования позднеплейстоценовых и голоценовых осадков в этом регионе ведутся в основном на шельфах, плато или в районах континентальной окраины, т. е. в зонах относительно быстрой седиментации [Struck, 1997; Andersen et al., 2004; de Vernal et al., 2013a; Van Nieuwenhove et al., 2016]. Глубоководная часть Норвежского моря в настоящее время исследована

в значительно меньшей степени, особенно редко здесь количественные реконструкции палео-гидрологических параметров поверхностных вод.

Данные по распределению микрофоссилий в осадках колонки АМК-6150 позволили реконструировать значения палеотемпературы поверхностных вод и продолжительность ледового покрова, охарактеризовать условия морской среды, существовавшие на разных этапах осадконакопления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Колонка АМК-6150 (74°46,813' с. ш., 08°26,052' в. д.) получена в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна в 75-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2019) с помощью мультискора Mini Muc К/МТ 410 [Клювиткин и др., 2020]. Колонка отобрана в районе восточного подножья хр. Книповича с глубины моря 3013 м (рис. 1). Точка находится на границе между субарктической Северной Атлантикой и Северным Ледовитым океаном, в зоне сезонно мигрирующих фронтов с особенно контрастными проявлениями климатических колебаний. Здесь проходит Западно-Шпицбергенское течение – главная ветвь Норвежского течения, огибающая Шпицберген с запада и севера.

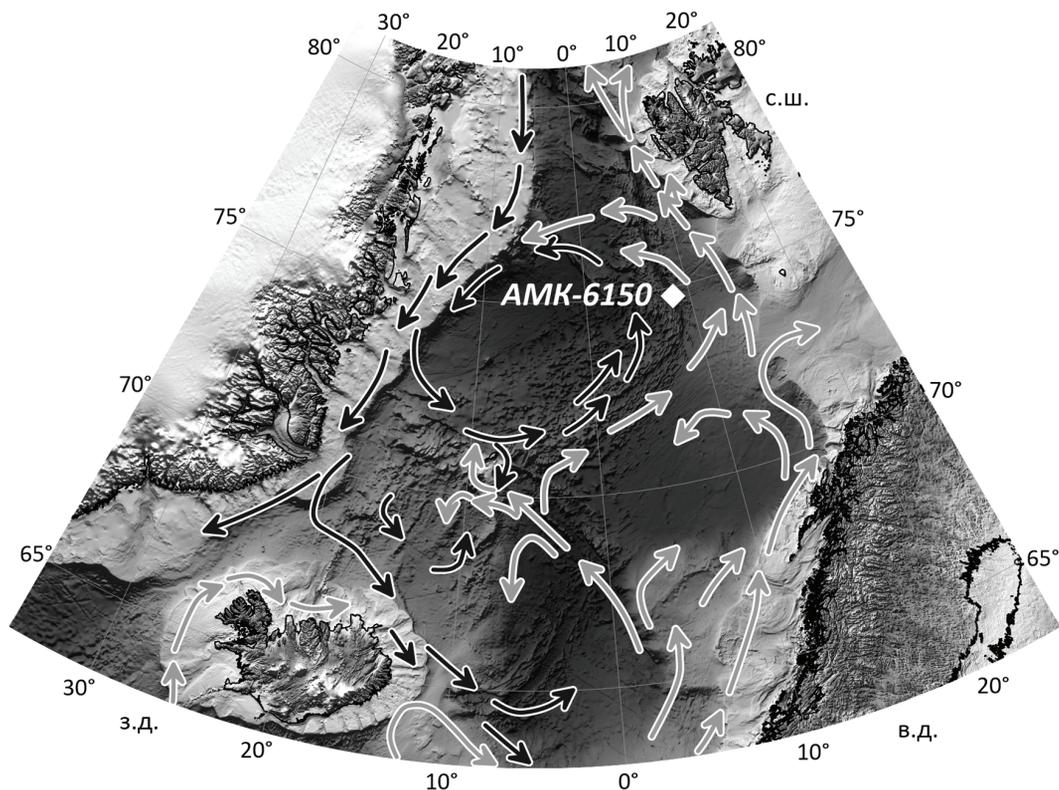


Рис. 1. Местоположение колонки АМК-6150 в Норвежском море. Черными и серыми стрелками показаны холодные и теплые течения соответственно [Blindheim, Rey, 2004]

Fig. 1. Location of AMK-6150 core in the Norwegian Sea. Black and gray arrows show cold and warm currents, respectively [Blindheim, Rey, 2004]

Длина колонки составляет 31 см. В соответствии с литологическим описанием колонки, выполненным на борту судна, установлено, что нижние 31–2 см осадка представлены карбонатным алевритистым илом темно-коричневого цвета (7.5YR 3/4), в то время как верхние 2 см сложены обводненным биотурбированным алевритовым илом более светлого оттенка (10YR 3/3), вероятно за счет поверхностного окисления. Увеличение крупности осадка в верхнем слое обусловлено наличием мелких раковин фораминифер. Образцы для изучения микрофоссилий отбирались с интервалом 1 см. Анализы цист динофлагеллят, диатомовых водорослей и фораминифер (планктонных и бентосных) выполнены для 31 образца. Перед химической и механической обработкой все пробы были высушены в лиофильной сушке ALPHA 1-4 LDplus Martin Christ (Германия).

Химическая обработка проб на анализ диноцист осуществлялась по общепринятой палинологической методике [de Vernal, 2010]. Для определения концентраций микроводорослей на начальной стадии в предварительно взвешенный осадок добавлялись таблетки, содержащие фиксированное количество спор *Lycopodium clavatum*. Для растворения карбонатов и кремнесодержащих частиц использовались соляная (HCl) и фтористоводородная (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 Neovar 2 и Jenaval (Carl Zeiss) с увеличением в 400 и 1000 раз. В каждом образце было идентифицировано как минимум 300 цист динофлагеллят.

Диноцисты широко распространены в Арктике и Северной Атлантике (динофлагелляты относятся к одним из основных компонентов морского фитопланктона) и, в отличие от многих других микроорганизмов, прекрасно сохраняются в донных осадках. Методической основой применения диноцист в палеоокеанологических исследованиях служит наличие обширной, постоянно пополняемой базы данных, охватывающей весь Мировой океан и, в частности, Северную Атлантику, Арктику и Норвежско-Гренландский бассейн [Rochon et al., 1999; de Vernal et al., 2020]. В базу, содержащую на сегодняшний день 1968 поверхностных образцов, входят данные об ассоциациях диноцист (концентрации и видовой состав), а также основные гидрологические параметры морских поверхностных вод [de Vernal et al., 2020].

Подготовка образцов для диатомового анализа выполнялась по стандартной методике [Диатомовые водоросли СССР, 1974] и заключалась в термической обработке осадка в 10% растворе перекиси водорода (H₂O₂) и последующей декантации дистиллированной водой до полного отмучивания

от перекиси и глинистых частиц. Видовые определения диатомей в препаратах осуществлялись с помощью микроскопа Axiostar plus (Carl Zeiss) при увеличении в 1000 раз с использованием иммерсии Immersol 518 N (Carl Zeiss Microscopy GmbH) с показателем преломления 1,518. Количественная оценка состава диатомовых ассоциаций выполнена по методу Баттарби [Battarbee, 1973]. Для этого в составе диатомовых ассоциаций подсчитывалось 300–400 створок (за исключением двух нижних образцов 29–30 и 30–31 см, где диатомеи обнаружены не были).

Возможность использования диатомовых водорослей в качестве индикаторов палеоокеанологических условий базируется на высокой степени изученности ассоциаций диатомей в поверхностных, плейстоценовых и голоценовых отложениях [Andersen et al., 2004; Koç et al., 2013; Oksman et al., 2019] исследуемого района и его ближайших окрестностей. Для целей палеореконструкций все диатомеи в колонке АМК-6150 были разделены на группы по экологическим признакам в соответствии с опубликованными источниками [Pankow, 1990; Жузе, 1962; Диатомовые водоросли СССР, 1974; Horner, 1989; Von Quillfeldt, 1997; Oksman et al., 2019; Полякова и др., 2021].

Для предварительного анализа ассоциаций бентосных и планктонных фораминифер взвешенный осадок фильтровался через сито фракции >0,063 мм (бентос) или >0,1 мм (планктон). В готовых препаратах насчитывали, как правило, 250–350 экземпляров микрофоссилий, определяли таксоны, их относительное содержание (%) и абсолютную концентрацию (экз./г сухого осадка).

По материалам анализа цист динофлагеллят в колонке АМК-6150 реконструированы количественные значения летней температуры поверхностного слоя вод (°C) и продолжительность ледового покрова (месяцев в году). Палеореконструкции выполнены методом современных аналогов (Modern Analogue Technique; MAT) [Guiot, de Vernal, 2007; de Vernal et al., 2013b, 2020] с использованием пакета программного обеспечения bioindic для R и базы данных диноцист 2020 г. ($n = 1968$) [de Vernal et al., 2020]. Для оценки надежности реконструкций использовалась методика кодов достоверности (reliability codes), учитывающая для каждого образца число подсчитанных в препарате диноцист, сходство с найденными аналогами и количество наиболее близких из них [de Vernal et al., 2013a]. Коды, рассчитанные таким образом, ранжируются от *A* для наиболее надежных оценок до *D* для реконструкций, основанных на малом количестве диноцист и/или неудачных аналогах [Van Nieuwenhove et al., 2016]. Результаты реконструкций для всех образцов колонки АМК-6150 попали в категорию *A*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ фораминифер. На глубине 31–23 см планктонные фораминиферы отсутствуют, что связано, вероятно, с растворением. В этом интервале наблюдаются относительно низкие численность (около 100 экз./г сух. осадка) и разнообразие (5–7 видов на пробу) бентосных фораминифер. Повышенное содержание в осадках известкового *Oridorsalis umbonatus* и агглютинированных таксонов, в основном представленных видом *Cribrostomoides subglobosus*, указывают на условия с низким потоком органических частиц, холодные обстановки и отсутствие придонных течений [Struck, 1997].

В интервале 23–0 см происходит увеличение общей численности (планктонных до 9000 экз./г и бентосных до 1000 экз./г) и разнообразия (10–20 бентосных видов на пробу) фораминифер, смена бентосного доминанта на *Epistominella exigua* и первое появление малочисленных раковин *Triloculina trihedra*, *Cibicides lobatulus* и *Cassidulina reniforme*. Это, вероятно, указывает на изменения условий осадконакопления, связанные с началом поступления в район значительного количества органического вещества совместно с теплыми водами североатлантического происхождения, которые, вероятно, активно распространяются в глубинном или придонном слое водной толщи [Rasmussen, Thomsen, 2017; Кулешова, Пономаренко, 2018]. Ассоциация планктонных фораминифер представлена видами *Neogloboquadrina pachyderma* sin. (60–100%), *N. pachyderma* dex. (до 6%), *Turborotalita quinqueloba* (до 32%), а также *Globigerina bulloides* и *G. glutinata* (суммарно около 1% в интервале 0–2 см). Такого рода холодноводная ассоциация планктонных фораминифер характерна для голоценовых осадков областей континентальной окраины Баренцева моря (колонка M23258 [Risebrobakken et al., 2011; Sarnthein et al., 2003]).

Таким образом, по данным о составе ассоциаций фораминифер на глубине 23 см в осадках колонки фиксируется резкая смена условий осадконакопления в сторону значительного потепления и усиления притока североатлантических вод.

Анализ диноцист. Осадки колонки характеризуются абсолютным преобладанием цист динофлагеллят в составе органических микроводорослей. Все встреченные экземпляры отличались прекрасной сохранностью. Концентрации диноцист варьируют от 13 до 185 тыс./г сухого осадка, их содержание максимально в нижней части колонки, сложенной наиболее тонким материалом, а вверх по разрезу в целом снижается (рис. 2). Также в некоторых пробах отмечены пресноводные зеленые водоросли *Pediastrum* и *Botryococcus*, количество которых не превышает 500 экз./г. Кроме микроводорослей, в препаратах еди-

нично, в основном в верхней части разреза, обнаружены органические остатки скелетов фораминифер.

Всего идентифицировано 20 видов и видовых групп диноцист. Преобладают виды, характерные для послеледниковых и голоценовых осадков Западной Арктики и Северной Атлантики [Zonneveld et al., 2013; Van Nieuwenhove et al., 2016; Brice et al., 2020]. Более 75% в составе ассоциаций во всех пробах занимает *Operculodinium centrocarpum*, типичный вид для северо-восточной части Атлантического океана и Норвежского моря [Rochon et al., 1999; Zonneveld et al., 2013]. Заметную роль в ассоциациях играет также космополитный *Nematosphaeropsis labyrinthus*, в ряде проб его содержание превышает 10%. Абсолютное преобладание *O. centrocarpum* над *N. labyrinthus* – характерная черта среднего и позднего голоцена Норвежско-Гренландского бассейна. Данные по диноцистам из ряда колонок, изученных в этом регионе, показывают, что ранний голоцен характеризовался обратной картиной, т. е. преобладанием *N. labyrinthus* в составе ассоциаций. Смена доминант произошла около 6–7 тыс. лет назад [Van Nieuwenhove et al., 2016], следовательно, возраст осадков колонки АМК-6150, по-видимому, не превышает 7 тыс. лет.

Кроме *O. centrocarpum* и *N. labyrinthus*, в осадках колонки присутствуют *Impagidinium pallidum* (до 8,8%), *Brigantedinium* spp. (до 3,1%), цисты *Pentapharsodinium dalei* (до 1,9%), *Spiniferites elongatus* (до 1,8%), *S. ramosus* (до 1,8%), группа видов *S. mirabilis/hyperacanthus* (до 1,7%), *Bitectatodinium tepikiense* (до 1,7%) и *Impagidinium sphaericum* (до 1,2%). Единично встречены *Ataxodinium choanum*, *Islandinium minutum* subsp. *minutum*, *Lingulodinium machaerophorum*, *Trinovantedinium applanatum*, *Spiniferites belerius* и *S. lazus*. Состав ассоциаций диноцист значительно варьирует по разрезу, указывая на заметные перестройки условий среды, происшедшие в период накопления осадков.

В нижней части колонки, на глубинах 31–24 см, в составе диноцист на фоне общего доминирования *O. centrocarpum* повышено содержание холодноводных *Impagidinium pallidum* (до 4%) и *Spiniferites elongatus* (до 1,1%). Пик содержания этих видов отмечается на глубине 25–26 см. В современных осадках *I. pallidum* и *S. elongatus* широко распространены в высоких широтах. *I. pallidum* достигает 40% в ассоциациях диноцист Гренландского моря [Rochon et al., 1999], также обильно в зоне Полярного фронта [Zonneveld et al., 2013]. *S. elongatus* прекрасно адаптирован к ледовым арктическим условиям, встречается во фьордах Шпицбергена [Grøsfjeld et al., 2009] и повсеместно в Баренцевом море [Zonneveld et al., 2013; de Vernal et al., 2020]. Содержание тепловодных видов в этом интервале минимально. Это может свидетельствовать о том, что осадконакопление шло в условиях низких температур поверхностных вод и близости сезонного морского льда.

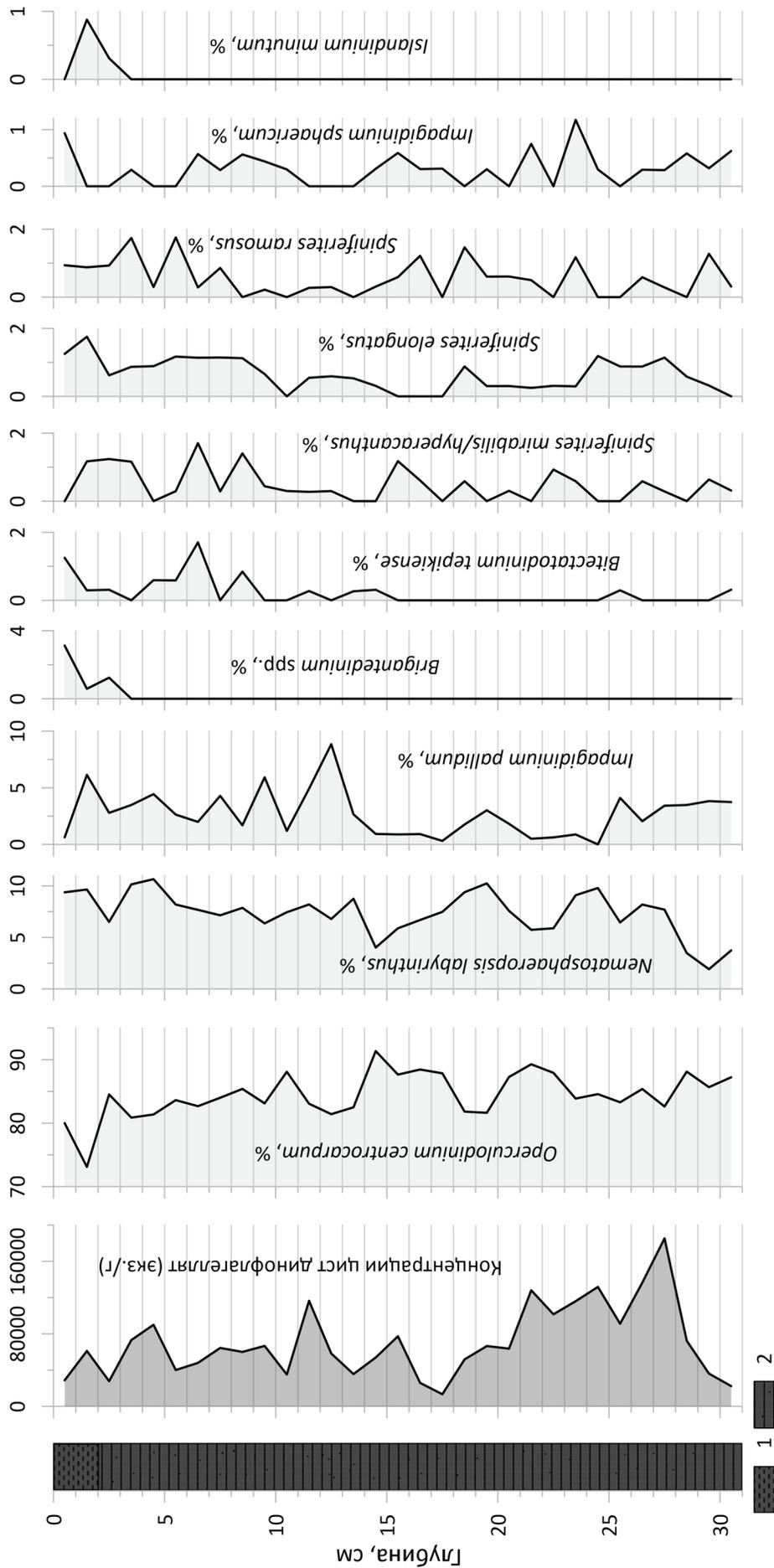


Рис. 2. Литология колонки АМК-6150: 1 – алевитовый ил; 2 – алевитистый ил; концентрация и процентные содержания индикаторных видов цист динофлагеллят

Fig. 2. Lithological descriptions (1 – aleurit, 2 – silty pelite), concentration and relative abundances of the main dinocyst taxa in core АМК-6150

Существенная смена условий осадконакопления, судя по ассоциациям диноцист, происходит на глубине 24 см. Она выражается в резком, практически до нуля, снижении содержания *I. pallidum* и *S. elongatus*, при этом в составе ассоциаций возрастает роль *Spiniferites ramosus*, *Impagidinium sphaericum* и группы видов *Spiniferites mirabilis/hyperacanthus*, которые можно считать относительно тепловодными для Норвежско-Гренландского региона. *S. mirabilis/hyperacanthus* широко распространены в умеренных и экваториальных районах Атлантики. *S. ramosus* может присутствовать в морских осадках от субполярных до экваториальных регионов, при этом его распределение ограничено зонами полярных фронтов. Можно предположить, что такой комплекс диноцист формировался в условиях относительного повышения температуры и солености поверхностных вод и, возможно, при некотором усилении влияния Норвежского течения.

Выше по разрезу, в коротком интервале осадков 14–12 см, снова увеличивается число холодноводных видов. Содержание *I. pallidum* резко возрастает до 8,8%, при этом *S. ramosus*, *I. sphaericum* и *S. mirabilis/hyperacanthus* практически исчезают. По-видимому, осадки в этом интервале накапливались во время эпизода похолодания, усиления влияния арктических водных масс.

Выше 12 см находится интервал, в котором происходят резкие, скачкообразные изменения концентраций индикаторных видов, указывающие, предположительно, на короткие и быстрые смены условий осадконакопления.

В самой верхней части колонки опять можно наблюдать смену комплексов цист динофлагеллят: в коротком интервале глубин 1–3 см заметно снижаются их концентрации, а в составе ассоциаций появляются, хоть и в небольших количествах (до 1% либо единично), типичные арктические виды *Islandinium minutum* и *Brigantedinium* spp., не встречающиеся в других частях ядра. Вид *I. minutum* – самый распространенный в осадках шельфовых морей Арктики, его содержание часто достигает 97%. В районах, где температура поверхностных вод зимой опускается ниже 0°C, а летом ниже 5°C, *I. minutum* отмечается в количествах свыше 10% [Zonneveld et al., 2013]. *I. minutum* и *Brigantedinium* spp. широко распространены в осадках вдоль восточного побережья Гренландии, а также во фьордах Шпицбергена [Grøsfjeld et al., 2009; Zonneveld et al., 2013]. С удалением к западу от берегов этого архипелага и с увеличением глубины, по мере того как условия поверхности моря меняются от арктических (холодных, с сезонным морским льдом) к атлантическим (относительно

теплым и соленым), ассоциации с доминированием *I. minutum* в поверхностных осадках сменяются ассоциациями с преобладанием *O. centrocarpum* [Solignac et al., 2009]. Кроме того, в данном интервале осадков нашей колонки снова возрастает количество *I. pallidum* (до 6,1%) и *S. elongatus* (до 1,8%), однако содержание *S. ramosus* и *S. mirabilis/hyperacanthus* при этом существенно не меняется. Таким образом, комплекс диноцист в интервале 1–3 см может указывать на возможное похолодание в период формирования осадков, связанное, по-видимому, с влиянием арктических вод в месте взятия колонки.

Диатомовый анализ. Суммарные концентрации диатомовых водорослей изменяются от 55 до 693 тыс. ств./г сухого осадка, в целом увеличиваясь снизу вверх (рис. 3). Всего идентифицировано 54 вида диатомей, из них 38 морских неритических и панталасных, 9 морских сублиторальных и 7 пресноводных. Среди неритических и панталасных видов выделены относительно тепловодные *Coscinodiscus radiatus*, *C. asteromphalus*, *Shionodiscus oestrupii*, *Asteromphalus brookei* var. *robustus* и др. и относительно холодноводные *Thalassiosira baltica*, *T. eccentrica*, *Fragilariopsis atlantica* и др. Особое внимание уделялось ледово-морским видам *Attheya septentrionalis* и *Fragilariopsis oceanica*, связанным с морским льдом на протяжении по крайней мере части своего жизненного цикла [Усачев, 1949; Horner, 1989], а также ледово-неритическим видам *Porosira glacialis*, *Thalassiosira nordenskiöldii*, *Bacterosira bathyomphala*, *Rhizosolenia hebetata* f. *hebetata* и др., которые развиваются в фитопланктоне краевой ледовой зоны при температурах, близких 0°C или ниже [Horner, 1989; Von Quillfeldt, 1997; Полякова и др., 2021].

По всему разрезу большая часть ассоциаций диатомовых водорослей представлена относительно тепловодными видами (58–92%), типичными для этой части океана [Oksman et al., 2019], за исключением *Shionodiscus oestrupii*, который наиболее распространен на широтах 40–60° с. ш. и переносится севернее теплыми и солеными водами Северо-Атлантического течения [Oksman et al., 2019].

В нижней части колонки, в интервале 29–24 см (два образца на глубинах 31–29 см не содержали диатомовых водорослей), концентрации диатомей варьируют от 55 до 430 тыс. ств./г, а их ассоциации насчитывают 21 вид. Доля сублиторальных видов, представленных до глубины 7,5 см, исключительно *Paralia sulcata*, в данной части колонки уменьшается снизу вверх с 14,3 до 2,2%. В трех образцах на глубинах 28–29, 27–28 и 24–25 см обнаружены единичные створки вымерших видов диатомей.

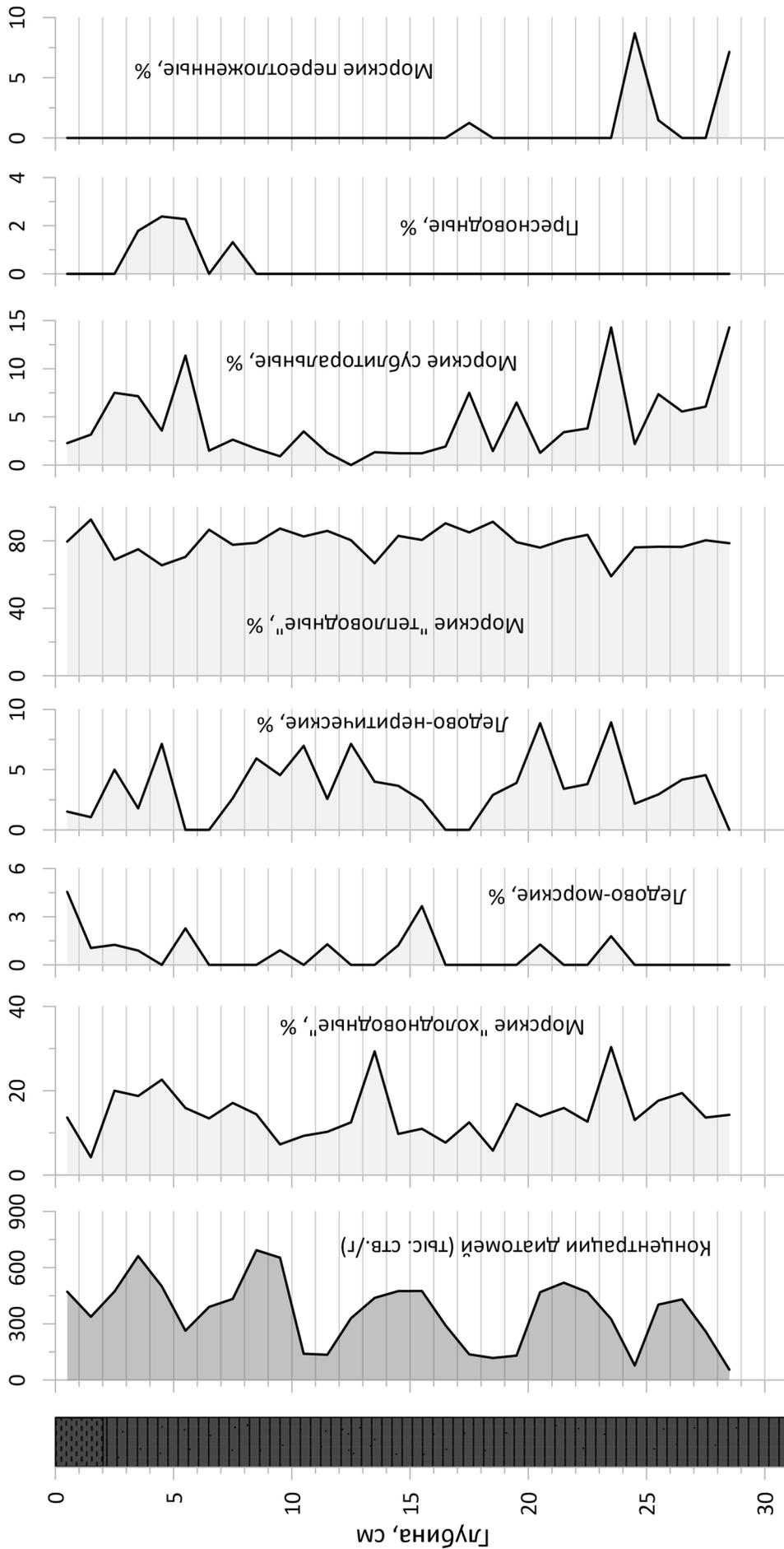


Рис. 3. Концентрации и распределение основных экологических групп диатомовых водорослей в осадках колонки АМК-6150

Fig. 3. Concentrations and distribution of the main ecological groups of diatoms in AMK-6150 core

На глубине 28–29 см они представлены *Thalassiosira undulosa*, характерным для палеогеновых отложений [Атлас микроорганизмов..., 1977], а на 27–28 см – *Hemiaulus polymorphus*. На глубине 24–25 см комплекс переотложенных диатомей состоит из четырех палеогеновых видов: *H. polymorphus*, *Eupyxidicula turris*, *Pyxilla caput-avis* var. *gracilis*, *Creswellia ferox*, здесь же отмечены силикофлагеллаты *Ebriopsis antiqua*. Данные виды, скорее всего, поступали в северо-восточную часть Норвежско-Гренландского бассейна с баренцевоморского шельфа, где ископаемые палеогеновые и неогеновые диатомей часто встречаются в современных и четвертичных отложениях [Полякова и др., 2021].

Суммарные концентрации диатомей в залегающих выше отложениях сперва растут до глубины 21,5 см и значений 519 тыс. ств./г, затем снижаются до 117 тыс. ств./г, а начиная с 18,5 см вновь увеличиваются до значений 475 тыс. ств./г на глубине 15,5 см. Таксономическое разнообразие диатомовых водорослей в интервале 24–14 см составляет 22 вида. От 23–24 см и выше в отложениях появляются створки ледово-морских видов, содержание ледово-неритических и холодноводных диатомей достигает максимума (8,9 и 30,3% соответственно), а доля сублиторальных видов увеличивается до 14,3%. На глубине 20–21 см наблюдаются локальные пики ледово-морских и ледово-неритических диатомей, при этом несколько снижается (до 75,9%) доля относительно тепловодных видов. Выше по разрезу, до глубины 14–15 см, доля относительно холодноводных и сублиторальных видов последовательно сокращается до 9,8 и 1,2% соответственно, а содержание относительно тепловодных видов повышается до 91,3% на глубине 18–19 см. Появление ледово-морских и увеличение доли ледово-неритических видов диатомей, так же как и смена комплекса диноцист на более тепловодные на глубине 24 см, может свидетельствовать об относительном повышении температуры и солености поверхностных вод за счет усиления влияния Норвежского течения и возможном отступании границы сезонных морских льдов на север. Таяние льда могло способствовать поступлению ледово-морских видов диатомей во время их вегетации в прикромочной зоне льдов в осадочное вещество и дальнейшему их сохранению в отложениях. Это подтверждается недавними исследованиями состава диатомовых ассоциаций осадочного вещества в северо-восточной части Баренцева моря [Агафоновна et al., 2023] и осадочного вещества, льда и поверхностных отложений одного из фьордов северо-восточной Гренландии [Limoges et al., 2018]. Результаты этих работ показали, что ледово-морские диатомей поступают в осадочное вещество и поверхностные осадки во время и по-

сле таяния сезонного морского льда [Limoges et al., 2018; Агафоновна et al., 2023].

В интервале глубин 14–12 см наблюдается локальный пик морских относительно холодноводных видов диатомей, доля которых возрастает до 29,3%, и увеличивается до 7,1% число ледово-неритических видов, при этом практически отсутствуют ледово-морские и морские сублиторальные диатомей. На глубине 13,5 см снижается доля относительно тепловодных видов (до 66,6%), преимущественно за счет уменьшения содержания *Thalassionema nitzschioides*. Такая смена комплексов микроводорослей (как диатомей, так и диноцист) на более холодноводные свидетельствует о накоплении осадков на глубинах 14–12 см в условиях снижения температуры поверхностных вод в районе исследования.

В верхней части колонки суммарные концентрации диатомей имеют два пика – на глубине 8,5 см (до максимальных значений – 693 тыс. ств./г) и 3,5 см (661 тыс. ств./г). В интервале 12–3 см обнаружено 34 вида диатомей. С глубины 8,5 до 3,5 см наблюдается некоторое увеличение доли морских холодноводных видов снизу вверх от 13–14 до 22%. В составе диатомовых ассоциаций на глубине 7,5 см появляются пресноводные виды, представленные планктонными *Aulacoseira islandica*, *A. subarctica*, *Cyclotella meneghiniana* и бентосными видами *Amphora copulata* и *Gomphonema parvulum*. Их появление наряду с небольшим увеличением доли ледово-морских видов может быть связано со смещением к югу положения Полярного фронта, т. е. зоны максимального распространения летнего морского льда, и/или с поступлением айсбергов. Источником пресноводных видов диатомей во льдах, вероятно, служат водотоки архипелага Шпицберген.

Концентрации диатомей в верхней части колонки изменяются незначительно, в целом уменьшаясь снизу вверх до 471 тыс. ств./г. В верхних 3 см увеличивается доля ледово-морских видов и снижается количество ледово-неритических. Пресноводные виды диатомей в верхней части колонки обнаружены не были. Состав микроводорослей свидетельствует об установлении современных условий осадконакопления, для которых, судя по увеличению доли ледово-морских и относительно холодноводных видов диатомовых водорослей (в верхних 1,5 см), в целом характерно усиление влияния арктических водных масс.

Количественные палеорекострукции. По материалам анализа цист динофлагеллят в колонке АМК-6150 выполнены первые реконструкции средней летней температуры поверхностных вод и продолжительности ледового покрова (рис. 4). Результаты показывают, что за время накопления осадков колонки температура в данной точке варьировала от

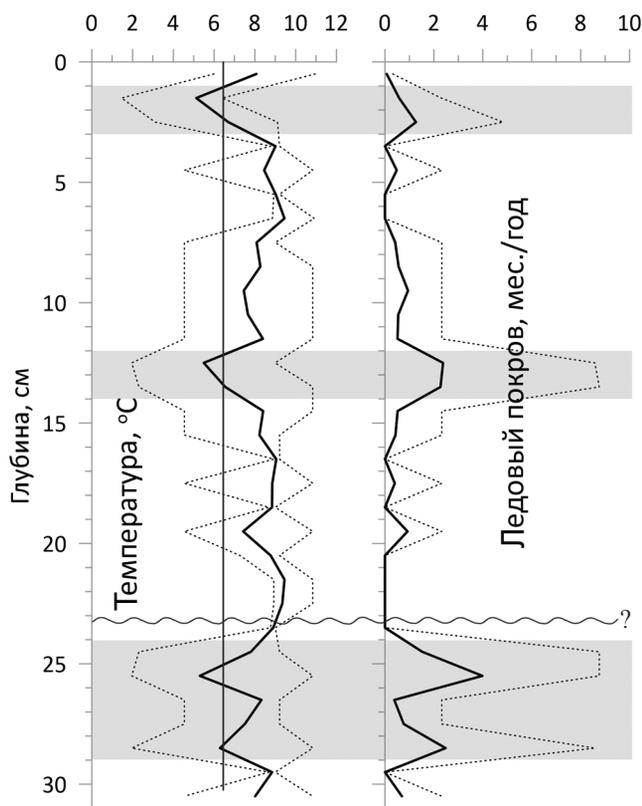


Рис. 4. Реконструированные по цистам динофлагеллят в осадках колонки АМК-6150 средняя летняя температура поверхностных вод и продолжительность ледового покрова.

Сплошная линия на графиках показывает среднее, наиболее вероятное значение; пунктиром ограничен доверительный интервал. Серая вертикальная линия обозначает современную среднюю летнюю температуру поверхностных вод в точке отбора колонки (~6,3°C), волнистой линией отмечена предполагаемая граница смены условий осадконакопления в сторону существенного потепления; фоном выделены интервалы, осадки в которых накапливались, вероятно, в эпохи относительных похолоданий

Fig. 4. The summer sea-surface temperatures (SST) and sea-ice cover duration reconstructed by the dinocyst assemblages in AMK-6150 core.

Solid lines show mean, most probable values and dotted lines delimit the confidence interval. Grey vertical line indicates the current mean summer SST at the core site (~6,3°C). The wavy line marks a supposed threshold for significant warming; the background color indicates the intervals of deposition under relative cooling epochs

5,1 до 9,5°C, оставаясь в среднем выше современного значения (~6,3°C согласно Атласу Мирового океана (World Ocean Atlas)). Тем не менее в нижней части колонки, на глубинах 24–29 см происходит ее заметное снижение, а в образце 25–26 см значение опускалось до 5,3°C. Температуры ниже современ-

ных реконструированы также для интервалов 14–12 см (до 5,5°C) и 3–1 см (до 5,1°C). Этим же глубинам соответствуют интервалы увеличения вероятности появления сезонного льда (учитывая, что в настоящее время точка отбора колонки находится вне зоны распространения льдов). Таким образом, по результатам реконструкций можно заключить, что эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

ВЫВОДЫ

Первые результаты детального микропалеонтологического изучения осадков колонки АМК-6150 позволили сделать выводы о времени их накопления и о природных условиях, господствовавших в то время. Установлено, что:

- согласно предварительным данным о климатостратиграфии по составу ископаемых микрофоссилий период формирования осадков колонки АМК-6150 не превышает 7 тыс. лет;

- появление в осадках на глубине 23–24 см относительно теплопроводных цист динофлагеллят и диатомовых водорослей, а также смена ассоциаций бентосных фораминифер указывают на начало существенного повышения температуры и солености поверхностных вод за счет возможного усиления влияния Норвежского течения и, как следствие, отступление границы сезонных морских льдов на север;

- согласно видовому и количественному составу ассоциаций диноцист и диатомей, а именно снижению роли относительно теплопроводного североатлантического комплекса и началу доминирования арктических видов, осадки в коротком интервале глубин 14–12 см накапливались в период заметного снижения температуры и усиления влияния арктических водных масс;

- по результатам количественных палеореконовструкций эпизоды похолодания и предполагаемого появления морского сезонного льда были возможны во время накопления осадков на глубинах 29–24, 14–12 и 3–1 см.

Дальнейшие исследования осадков колонки АМК-6150, и в первую очередь радиоуглеродное датирование, позволят уточнить полученные данные, выделить основные палеогеографические события, провести корреляцию с имеющимися данными по другим колонкам Норвежско-Гренландского региона и получить полную, детализированную по времени картину развития природных условий у подножия хр. Книповича.

Благодарности. Работа выполнена по гранту РФФИ № 21-17-00235 при дополнительной поддержке по теме госзаказов Минобрнауки № FMWE-2021-0006 (отбор проб осадков в экспедициях ИО РАН) и Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121051100135-0 (микроскопные исследования). Авторы благодарны экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш», всем участникам экспедиции, в особенности А.А. Клювиткину и Г.В. Малафееву, за всестороннее содействие и помощь в отборе проб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас микроорганизмов в донных осадках океанов (диатомей, радиолярии, силикофлагелляты, кокколиты) / под ред. А.П. Жузе. М.: Наука, 1977. 196 с.
- Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1 / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Жузе А.П. Стратиграфические и палеогеографические исследования в северо-восточной части Тихого океана. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 259 с.
- Клювиткин 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. DOI: 10.31857/S003015742003003X.
- Кулешова Л.А., Пономаренко Е.П. О роли видов бен-тосных фораминифер *Alabaminella weddellensis* и *Epistominella exigua* в палеоокеанологических реконструкциях // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер.: Естественные и медицинские науки. 2018. № 4. С. 94–104.
- Полякова Е.И., Новичкова Е.А., Агафонова Е.А. Диатомей и водные палиноморфы в донных осадках Баренцева моря: основные закономерности распространения и использование в палеоокеанологических исследованиях // Система Баренцева моря / под ред. акад. А.П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 64–95. DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(8).
- Усачев П.И. Микрофлора полярных льдов // Труды ИОАН. 1949. Т. 3. С. 216–359.
- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea, *Geosciences*, 2023, no. 13(1), DOI: 10.3390/geosciences13010001.
- Andersen C., Koç N., Jennings A., Andrews J. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability, *Paleoceanography*, 2004, no. 19, PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, no. 18(4), p. 647–653.
- Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s, *ICES Journal of Marine Science*, 2004, no. 61, p. 846–863, DOI: 10.1016/j.icesjms.2004.05.003.
- Brice C., de Vernal A., Ivanova E. et al. Palynological evidence of sea-surface conditions in the Barents Sea off northeast Svalbard during the postglacial period, *Quaternary Research*, 2020, no. 108, p. 180–194, DOI: 10.1017/qua.2020.2.
- de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological Preparation Techniques and Analyses. Notes Prepared for Students of Course SCT 8245. Montréal, Département des Sciences de la Terre, UQAM, 2010, 32 p.
- 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*, 2013a, no. 79, p. 111–121, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.07.006.
- 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, no. 159, 101796, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.101796.
- 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*, 2013b, no. 79, p. 122–134, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.06.022.
- Grosfjeld K., Harland R., Howe J. Dinoflagellate cyst assemblages inshore and offshore Svalbard reflecting their modern hydrography and climate, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 121–134.
- Guiot J., de Vernal A. Transfer functions: Methods for quantitative paleoceanography based on microfossils, *Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography*, C. Hillaire-Marcel, A. de Vernal (eds.), Amsterdam, Elsevier Science, 2007, p. 523–563, DOI: 10.1016/S1572-5480(07)01018-4.
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas*, Climatology, Oceanography, Geology, and Biology, Y. Herman (ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989, p. 123–146.
- Koç N., Miettinen A.I., Stickley C. Diatom records. North Atlantic and Arctic, *Encyclopedia of Quaternary Science*, Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2013, p. 567–576, DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00227-2.
- Limoges A., Masse G., Weckström K. et al. Spring succession and vertical export of diatoms and IP25 in a seasonally ice-covered High Arctic fjord, *Frontiers in Earth Science*, 2018, no. 6(226), DOI: 10.3389/feart.2018.00226.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A., Witkowski A., Weckström K. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleoceanographic reconstructions, *Marine Micropaleontology*, 2019, no. 148, p. 1–28, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pankow H. Ostsee-Algenflora, Gustav Fischer Jena, Verlag, 1990, 648 p.
- Rasmussen T.L., Thomsen E. Ecology of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic during the last glaciation: Food or temperature control, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, no. 472, p. 15–32.
- Risebrobakken B., Dokken T., Smedsrud L.H. et al. Early Holocene temperature variability in the Nordic Seas: The

- role of oceanic heat advection versus changes in orbital forcing, *Paleoceanography*, 2011, no. 26(4), PA4206, DOI: 10.1029/2011PA002117.
- Rochon A., Vernal de A., Turon J.-L. et al. Recent dinoflagellate cysts of the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters, *American Association of Stratigraphic Palynologists Contribution Series*, 1999, no. 35, p. 1–146.
- Sarnthein M., Van Kreveld S., Erlenkeuser H. et al. Centennial-to-millennial-scale periodicities of Holocene climate and sediment injections off the western Barents shelf, 75°N, *Boreas*, 2003, no. 32(3), p. 447–461, DOI: 10.1080/03009480310003351.
- Solignac S., Grøsfjeld K., Giraudeau J., de Vernal A. Distribution of modern dinocyst assemblages in the western Barents Sea, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 109–119.
- Struck U. Paleoeology of benthic foraminifera in the Norwegian-Greenland Sea during the past 500 ka, *Contribution to the Micropaleontology and Paleooceanography of the Northern North Atlantic: Grzybowski Foundation Special Publication*, 1997, no. 5, p. 51–83.
- 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, no. 26(5), p. 722–735, DOI: 10.1177/0959683615618258.
- Von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, no. 10, p. 211–240.
- 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, no. 191, p. 1–197, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2012.08.003.

Поступила в редакцию 10.02.2023

После доработки 14.06.2023

Принята к публикации 27.07.2023

HOLOCENE SEDIMENTATION HISTORY OF THE KNIPOVICH RIDGE AREA (THE NORWEGIAN SEA) BASED ON THE ANALYSIS OF MICROFOSSILS

T.S. Klyuvitkina¹, E.A. Agafonova², E.A. Novichkova³, L.A. Lozinskaia⁴,
M.P. Chekhovskaya⁵, A.G. Matul⁶, M.D. Kravchishina⁷

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Laboratory of Recent Deposits and Pleistocene Paleogeography

^{2,3,7} Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Lisitzin Laboratory of Physical-Geological Studies

⁴⁻⁶ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Paleoeology and Biostratigraphy Laboratory

¹ Senior Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: t.klyuvitkina@mail.ru

² Scientific Researcher, PhD. in Geography; e-mail: agafonovaelizaveta@mail.ru

³ Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology and Mineralogy; e-mail: enovichkova@mail.ru

⁴ Junior Scientific Researcher; e-mail: boda11@yandex.ru

⁵ Senior Scientific Researcher; e-mail: mjach47@mail.ru

⁶ Chief Scientific Researcher, Head of the Laboratory, D.Sc. in Geology and Mineralogy; e-mail: amatul@mail.ru

⁷ Leading Scientific Researcher, PhD. in Geology and Mineralogy; e-mail: kravchishina@ocean.ru

Climatic events of the last millennia in the northeastern part of the Norwegian-Greenland basin were reconstructed based on micropaleontological studies of sediments from the AMK-6150 core. New results were obtained from analyses of dinoflagellate cysts, diatoms, and benthic and planktonic foraminifers. These results allow us to infer the time of sediment accumulation and the prevailing natural conditions. According to preliminary data on climatostratigraphy based on the composition of microfossils, the period of sediment formation in the AMK-6150 core does not exceed 7 thousand years. The composition of microfossil assemblages and the results of reconstructions indicate repeated changes in marine environmental conditions during this time. Sediments at the depth of 23–24 cm recorded the beginning of a significant growth of temperature and salinity of surface waters due to a possible increase of the Norwegian Current influence. According to the species and quantitative composition of dinocyst and diatom assemblages, sediments in the short depth range of 14–12 cm accumulated during a period of noticeable decrease in temperature and increased influence of Arctic water masses. The analysis of dinocysts by the method of modern analogues allows reconstruction of the quantitative values of summer paleotemperatures of surface waters and the duration of ice cover. It was found that the cooling episodes and probable formation of seasonal sea ice were possible during the accumulation of sediments at the depths of 29–24, 14–12 and 3–1 cm.

Keywords: North Atlantic, marine geology, paleoreconstructions, diatoms, dinoflagellate cysts, foraminifers

Acknowledgements. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-17-00235) and additionally supported by the Ministry of Education and Science No. FMWE-2021-0006 (sampling during the expeditions of the IO RAS) and the Lomonosov Moscow State University No. 121051100135-0 (microscope analysis). The authors are grateful to the crew of the R/V Akademik Mstislav Keldysh, and to all members of the expedition, especially A.A. Klyuvitkin and G.V. Malafeev, for comprehensive assistance and help in sampling.

REFERENCES

- Agafonova E., Novichkova E., Novigatsky A. et al. Diatom and dinocyst production, composition and flux from the annual cycle sediment trap study in the Barents Sea, *Geosciences*, 2023, vol. 13, no. 1, DOI: 10.3390/geosciences13010001.
- Andersen C., Koç N., Jennings A., Andrews J. Nonuniform response of the major surface currents in the Nordic Seas to insolation forcing: Implications for the Holocene climate variability, *Paleoceanography*, 2004, vol. 19, PA2003, DOI: 10.1029/2002PA000873.
- Atlas mikroorganizmov v donnykh osadkakh okeanov (diatomei, radiolyarii, silikoflagellyaty kokkolity)* [Atlas of microorganisms in bottom sediments of the oceans (diatoms, radiolarians, coccoliths silicoflagellates)], A.P. Jousé (ed.), Moscow, Nauka Publ., 1977, 196 p. (In Russian)
- Battarbee R.W. A new method for the estimation of absolute microfossil numbers, with reference especially to diatoms, *Limnology and Oceanology*, 1973, vol. 18, no. 4, p. 647–653.
- Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s, *ICES Journal of Marine Science*, 2004, no. 61, p. 846–863, DOI: 10.1016/j.icesjms.2004.05.003.
- Brice C., de Vernal A., Ivanova E. et al. Palynological evidence of sea-surface conditions in the Barents Sea off northeast Svalbard during the postglacial period, *Quaternary Research*, 2020, no. 108, p. 180–194, DOI: 10.1017/qua.2020.2.
- de Vernal A., Henry M., Bilodeau G. Micropaleontological Preparation Techniques and Analyses. Notes Prepared for Students of Course SCT 8245, Montréal, Département des Sciences de la Terre, UQAM, 2010, 32 p.
- 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*, 2013a, no. 79, p. 111–121, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.07.006.
- 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, no. 159, 101796, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.101796.
- 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*, 2013b, no. 79, p. 122–134, DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.06.022.
- Diatomovye vodorosli SSSR (iskopaemye i sovremennye), t. I* [The diatoms of the USSR. Fossil and recent, vol. 1], A.I. Proshkina-Lavrenko (ed.), Leningrad, Nauka Publ., 1974, 403 p. (In Russian)
- Grøsfjeld K., Harland R., Howe J. Dinoflagellate cyst assemblages inshore and offshore Svalbard reflecting their modern hydrography and climate, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 121–134.
- Guiot J., de Vernal A. Transfer functions: Methods for quantitative paleoceanography based on microfossils, Proxies in Late Cenozoic Paleoceanography, C. Hillaire-Marcel, A. de Vernal (eds.), Amsterdam, Elsevier Science, 2007, p. 523–563, DOI: 10.1016/S1572-5480(07)01018-4.
- Horner R. Arctic sea-ice biota, *The Arctic Seas, Climatology, Oceanography, Geology and Biology*, Y. Herman (ed.), New York, Van Nostrand Reinhold Company, 1989, p. 123–146.
- Jousé A.P. *Stratigraficheskie i paleogeograficheskie issledovaniya v severo-vostochnoi chasti Tikhogo okeana* [Stratigraphic and paleogeographic studies in the northeastern Pacific Ocean], Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1962, 259 p. (In Russian)
- Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Nemirovskaya I.A. et al. Studies of sediment systems of the European Arctic during the 75th Cruise of the R/V Akademik Mstislav Keldysh, *Oceanology*, 2020, no. 60(3), p. 421–423.
- Koç N., Miettinen A.I., Stickley C. Diatom records. North Atlantic and Arctic, *Encyclopedia of Quaternary Science*, Netherlands, Amsterdam, Elsevier, 2013, p. 567–576. DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00227-2.
- Kuleshova L.A., Ponomarenko E.P. On the benthic foraminifera species of *Alabaminella weddellensis* and *Epistominella exigua* in paleo-oceanologic reconstructions, *Kantian Journal: Natural and medical sciences*, 2018, no. 4, p. 94–104. (in Russian)
- Limoges A., Masse G., Weckström K. et al. Spring succession and vertical export of diatoms and IP25 in a seasonally ice-covered High Arctic fjord, *Frontiers in Earth Science*, 2018, vol. 6, no. 226, DOI: 10.3389/feart.2018.00226.
- Oksman M., Juggins S., Miettinen A., Witkowski A., Weckström K. The biogeography and ecology of common diatom species in the northern North Atlantic, and their implications for paleoceanographic reconstructions, *Marine Micropaleontology*, 2019, vol. 148, p. 1–28, DOI: 10.1016/j.marmicro.2019.02.002.
- Pankow H. Ostsee-Algenflora. Gustav Fischer Jena, Verlag, 1990, 648 p.
- Polyakova Y.I., Novichkova E.A., Agafonova E.A. *Diatomei i vodnye palinomorfy v donnykh osadkakh Barentseva morya: osnovnye zakonomernosti rasprostraneniya i ispol'zovanie v paleoceanologicheskikh issledovaniyakh* [Diatoms and aquatic palynomorphs in the bottom sediments of the Barents Sea: Main patterns of distribution and use in paleoceanological studies], Sistema Barentseva morya [The Barents Sea System], A.P. Lisitzin (ed.), Moscow, GEOS Publ., 2021, p. 64–95, DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(8). (In Russian)

- Rasmussen T.L., Thomsen E. Ecology of deep-sea benthic foraminifera in the North Atlantic during the last glaciation: Food or temperature control, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, no. 472, p. 15–32.
- Risebrobakken B., Dokken T., Smedsrud L.H. et al. Early Holocene temperature variability in the Nordic Seas: The role of oceanic heat advection versus changes in orbital forcing, *Paleoceanography*, 2011, no. 26(4), PA4206, DOI: 10.1029/2011PA002117.
- 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, *American Association of Stratigraphic Palynologists Contribution Series*, 1999, no. 35, p. 1–146.
- Sarnthein M., Van Kreveld S., Erlenkeuser H. et al. Centennial-to-millennial-scale periodicities of Holocene climate and sediment injections off the western Barents shelf, 75°N, *Boreas*, 2003, no. 32(3), p. 447–461, DOI: 10.1080/03009480310003351.
- Solignac S., Grøsfjeld K., Giraudeau J., de Vernal A. Distribution of modern dinocyst assemblages in the western Barents Sea, *Norwegian Journal of Geology*, 2009, no. 89, p. 109–119.
- Struck U. Paleoecology of benthic foraminifera in the Norwegian-Greenland Sea during the past 500 ka, *Contribution to the Micropaleontology and Paleoclimatology of the Northern North Atlantic: Grzybowski Foundation Special Publication*, 1997, no. 5, p. 51–83.
- Usachev P.I. *Mikroflora polyarnykh l'dov* [Microflora of polar ice], Trudy IOAN, vol. 3 [Proc. Oceanol. Inst. USSR Acad. Sci.], 1949, p. 216–259/ (in Russian)
- 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, no. 26(5), p. 722–735, DOI: 10.1177/0959683615618258.
- Von Quillfeldt C.H. Distribution of diatoms in the Northern Water Polynya, Greenland, *Journal of Marine Systems*, 1997, vol. 10, p. 211–240.
- 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, no. 191, p. 1–197, DOI: 10.1016/j.revpalbo.2012.08.003.

Received 10.02.2023

Revised 14.06.2023

Accepted 27.07.2023