

УДК 551.461.8

СРЕДНЕ-ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНАЯ СТРАТИГРАФИЯ И УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В НОРВЕЖСКОМ МОРЕ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСА ДАННЫХ ПО ПАЛЕОМАРКЕРАМ

© 2024 г. Е. А. Новичкова^{1,*}, Л. Л. Дёмина¹, Д. П. Стародымова¹,
А. Г. Матуль¹, М. Д. Кравчишина¹, М. П. Чеховская¹, Н. С. Оськина¹,
Л. А. Лозинская¹, С. В. Сломнюк¹, А. С. Соломатина¹, К. С. Якимова¹

Представлено академиком РАН Л.И. Лобковским 29.05.2024 г.

Поступило 29.05.2024 г.

После доработки 11.07.2024 г.

Принято к публикации 16.07.2024 г.

Комплекс седиментологических, геохимических и микропалеонтологических методов позволил изучить и сопоставить пять новых разрезов донных отложений на субмеридиональном профиле от центра к северу Норвежского моря. Совместный анализ распределения материала ледового разнота, полярных/субполярных фораминифер, карбоната кальция, органического углерода, а также записей непрерывного геохимического сканирования кернов выявил чередование средне-позднечетвертичных ледниковых и межледниковых интервалов за последние 260 тыс. лет. Во время последнего оледенения конца среднего плейстоцена (МИС 6, 8) поставка терригенного материала значительно больше влияла на региональное осадконакопление по сравнению с поздним плейстоценом (МИС 2-4). Показаны локальные различия ледниковой и межледниковой седиментации между центральной и северной частями Норвежского моря.

Ключевые слова: Северная Атлантика, плейстоцен, литологические, геохимические и микропалеонтологические палеомаркеры, стратиграфия Норвежско-Гренландского бассейна.

DOI: 10.31857/S2686739724110068

ВВЕДЕНИЕ

Четвертичная стратиграфия и корреляция разрезов морских осадков, основанные на современном методе высокоразрешающего непрерывного сканирования литолого-геохимического состава кернов, становятся одними из приоритетных направлений исследований Мирового океана. Сканирование разреза с дискретностью 1 см и менее позволяет детально оценить природные условия седиментации по спектрофототомическим характеристикам осадков (светлота, насыщенность, тон), показателям магнитной восприимчивости, отображающим содержание ферромагнитных минералов, а также элементному составу с помощью рентгенофлуоресцентного анализатора. В последнем случае наиболее информативными считаются элементные

палеоиндикаторные отношения (Al/Ca, Ti/Ca, Zr/Ca и т.д.), вариации которых зависят от региональных условий окружающей среды и климата, существовавшего при формировании осадков. Данные сканирования кернов существенно дополняют традиционные седиментологические (гранулометрический анализ, определение CaCO_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$ и др.) и биостратиграфические (типичные микрофоссилии) исследования донных отложений и, вместе с радиоуглеродными датировками абсолютного возраста и распределением стабильных изотопов кислорода и углерода, обеспечивают хроностратиграфию осадков и реконструкцию палеосреды.

Общие схемы стратиграфии и площадной корреляции четвертичных отложений Норвежско-Гренландского бассейна разработаны по магнитометрии, содержанию биогенных карбонатов, изотопно-кислородным данным и биостратиграфии [1, 3]. Их детализация сейчас происходит на основании распределения новых показателей терригенной и биогенной составляющей осадков при непрерывном сканировании

¹Институт океанологии имени П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: enovichkova@mail.ru

кернов. Так, чередование пиков этих показателей — литогенных индикаторов (нормализованная интенсивность Ti, Al, Zr, и др.), поступление которых усиливалось во время ледниковых стадий, и биогенных индикаторов (нормализованная интенсивность Са, и др.), содержание которых повышалось во время межстадий и межледниковий, позволяет уверенно устанавливать циклы, обусловленные разномасштабной сменой условий осадконакопления.

В статье представлены новые результаты многофакторного анализа пяти колонок глубоководных средне-позднечетвертичных донных отложений, отобранных на субмеридиональном разрезе через Норвежское море от юго-западной части Лофотенской котловины вплоть до сочленения срединно-океанических хребтов (СОХ) Мона и Книповича. При этом основной подход к стратиграфии и палеоокеанологии основан на интерпретации геохимических данных, полученных при помощи автоматизированной системы комплексного сканирования кернов

MSCL—XYZ GEOTEK и сопоставленных с другими палеомаркерами.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Колонки донных осадков АМК-5188, -5189, -5190, -5191 и -5536 были отобраны в 62 и 68-м рейсах НИС “Академик Мстислав Келдыш” (2015 и 2017 гг., соответственно) в Норвежском море с помощью ударной грунтовой трубки большого диаметра (рис. 1, табл. 1). Осадки исследуемых колонок представлены в основном неравномерно чередующимися алевритово-пелитовыми илами коричневыми и серых оттенков.

Для колонки АМК-5188 получены данные по соотношению стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в раковинах планктонных фораминифер (вид *Neoglobobulimina pachyderma (sinistral)* (Ehrenberg), не менее 30 раковин в пробе). Анализ выполнен в Лаборатории радиометрического датирования и изотопных исследований им. К. Лейбница Кильского университета на

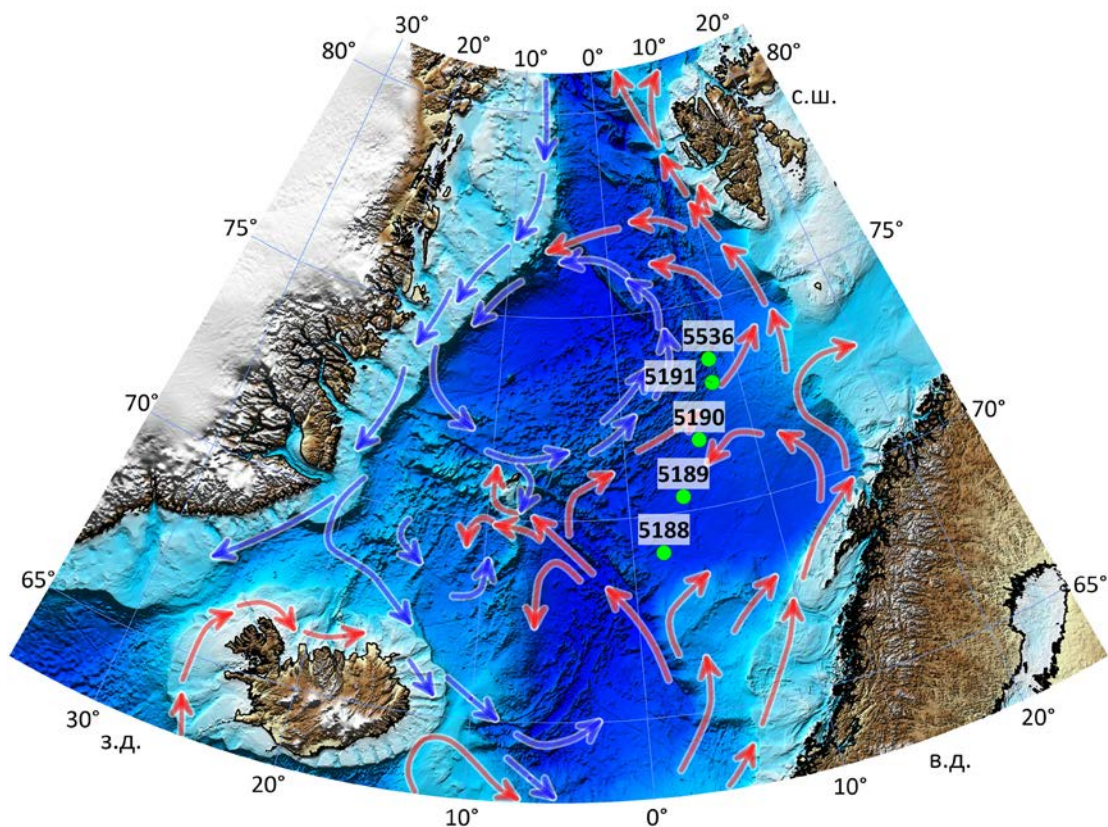


Рис. 1. Местоположение изученных колонок донных осадков и основные современные поверхностные течения (красные — тёплые, синие — холодные) [4].

Таблица 1. Колонки, использованные в работе

Номер колонки	Рейс НИС “Академик Мстислав Келдыш”	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина моря, м	Длина колонки, см
АМК-5188	АМК-62	69.067	2.067	3206	417
АМК-5189	АМК-62	70.367	3.933	3206	455
АМК-5190	АМК-62	71.683	5.800	2965	345
АМК-5191	АМК-62	73.000	7.750	2407	416
АМК-5536	АМК-68	79.805	47.006	2168	437

масс-спектрометре Finnigan MAT 251 доктором Н. Андерсеном. Все значения даны в промилле относительно международного стандарта VPDB. Точность метода составляет 0.07‰ VPDB.

В лабораториях Beta Analytic Testing Laboratory, Miami, FL, USA, и Poznan Radiocarbon Laboratory, Poznan, Poland для колонки АМК-5188 получены десять AMS¹⁴C-датировок ([2]) по раковинам планктонных фораминифер *N. pachyderma* (sin.). Данные по радиоуглеродному датированию и построенная по ним возрастная модель подробно рассмотрены в статье А. Г. Матуля [2] и учитываются в данном исследовании.

Определение содержания (%) общего ($C_{\text{общ}}$) и органического ($C_{\text{орг}}$) углерода сделано автоматическим кулонометрическим методом на анализаторе углерода АН 7529 (Белоруссия). Расчёт содержания CaCO_3 производился по формуле $(C_{\text{общ}} - C_{\text{орг}}) \times 8.3$, исходя из стехиометрических коэффициентов.

Микропалеонтологический анализ выявил общие концентрации (экз./г) и видовой состав (%) раковин планктонных фораминифер (ПФ) во фракции осадка >0.125 мм и бентосных фораминифер (БФ) во фракции осадка >0.063 мм. Во фракции >0.25 мм подсчитано количество (экз./г) зёрен ледового разноса (ice rafted debris – IRD).

Автоматизированная система комплексного сканирования кернов MSCL–XYZ GEOTEK, установленная в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН, позволила измерить с шагом 1 см вариации магнитной восприимчивости (magnetic susceptibility – MS) и элементного состава осадков. Использован рентгенофлуоресцентный (XRF) спектрометр GeotekXRF (15 Вт/50 кВ, Rh-анод) с гелиевой камерой (15×10 мм, время 1 с) и настройками трубок 10 кВ (70 мкА) и 40 кВ (95 мкА, с Ag-фильтром 125 мкм). Спектральные данные XRF обработаны с помощью программного обеспечения bAxil,

а результаты представлены в виде соотношений сигналов от элементов (количество отсчётов в секунду) и/или нормализованных значений для отдельного элемента. Для минимизации влияния влажности осадков пиковые области элементных профилей нормализованы на общий разброс, который включает некогерентное и когерентное рассеяние [13].

В дополнение к сканированию кернов выполнен элементный анализ сухих проб валового осадка с дискретностью 10 см методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии на приборе Спектроскан MAX-GVM (НПО КОРТЭК, Россия) [7]. Точность анализа составляла от 2 до 10% для разных элементов. Правильность анализа химических элементов контролировали с помощью стандартных образцов донных осадков отечественного (СДО-1 и –3) и иностранного производства (NIST Standard Reference Material® 2703, Национальный институт стандартов и технологии, США). Анализ парных корреляций между элементными отношениями выполнен с помощью программы Statistica 7.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Колонка АМК-5188 из глубоководной юго-западной части Лофотенской котловины использована в нашей работе как опорный разрез осадков. Распределение $\delta^{18}\text{O}$, CaCO_3 , $C_{\text{орг}}$ и типичных для разных климатических условий видов фораминифер позволило выделить восемь морских изотопно-кислородных стадий (МИС), охватывающих конец среднего плейстоцена, поздний плейстоцен и голоцен в пределах последних ~260 тыс. лет (рис. 2). Значения $\delta^{18}\text{O}$ для колонки АМК-5188 изменяются в пределах от 2.48 до 4.96‰ и в целом хорошо коррелируют с известными данными по Норвежско-Гренландскому бассейну, например, с колонкой PS1243–1 [3]. Утяжеление изотопного состава карбонатов до 4.5‰ более характерно для стадий 8, 6,

4–2, а для тёплых межстадиалов МИС 7, 5 и 1 установлены резкие пики изотопно-лёгких значений $\delta^{18}\text{O} \leq 3\text{‰}$. Изменение содержания CaCO_3 в колонке АМК-5188 также находится в прямой зависимости от чередования холодных и тёплых эпох, закономерно снижаясь практически до нулевых значений в ледниковых интервалах и возрастая до 20–30% во время межледниковий. Вариации общего содержания ПФ и БФ соответствуют распределению карбонатов в колонке. Доля полярного вида ПФ *N. pachyderma* (sin.) доходит до 100% в ледниковые МИС 8, 6, 4–2, в то время как содержание тепловодного вида *Turborotalita quinqueloba* возрастает до 20% во время тёплых МИС 7, 5 и 1. Увеличение доли вида БФ *Cibicidoides wuellerstorfi* до 40–60% установлено для тёплых МИС (особенно для оптимума последнего межледниковья МИС 5е), так как данный вид является индикатором усиления потока органического вещества (ОВ) на дно при потеплении [6]. Содержание IRD особенно увеличивается в осадках во время ледниковых МИС 6 и 4–2, отражая, соответственно, айсберговый разнос во время оледенений, когда материковые ледники достигали края шельфа СЗ Евразии [16, 10]. Общие особенности распределения фораминифер и их индикаторных видов, а также CaCO_3 и IRD, описанные для колонки АМК-5188, характерны для всех станций разреза и хорошо прослеживаются на графиках в пределах МИС 8–1 (рис. 2). Выделение морских изотопных стадий в колонке АМК-5188 на основании данных по изотопии кислорода раковин планктонных фораминифер с учётом результатов абсолютно датирования AMS^{14}C ([2]) позволило сделать

данную колонку опорной для всего литологического разреза.

Тем не менее, для каждой колонки решающий стратиграфический фактор рассматривался индивидуально, так как в связи с большой протяжённостью профиля осадки отобраны в разных областях Норвежского моря. Например, для наиболее сложной в плане корреляции колонке АМК-5189 решающим фактором стало присутствие агглютинированного стратиграфически важного вида *Siphotextularia rolshauseni*, маркирующего стадию МИС 2, с максимальным распространением на отметке 20–21 тыс.л.н. [14]. В тоже время, для колонок АМК-5190, 5191 и 5536, помимо индикаторных видов фораминифер, большое значение для стратиграфии приобретает фактор присутствия в осадках зёрен ледового разноса и соотношения терригенного и биогенного осадконакопления, реконструируемого по элементному составу осадков. Геохимические индикаторы (главным образом, Ti/Ca), используемые для корреляции колонок по профилю, рассмотрены ниже.

Для получения наиболее надёжных геохимических результатов проведено сопоставление результатов элементных XRF-анализов, выполненных двумя способами: 1) неdestructивный метод непрерывного линейного сканирования осадочного керна естественной влажности и 2) традиционный анализ отдельных таблетированных проб сухого осадка. Линейное сканирование позволило получить детальные записи элементов по всей длине кернов. Однако при сканировании керна сигналы от элементов могут искажаться в зависимости от влажности, гранулометрического состава

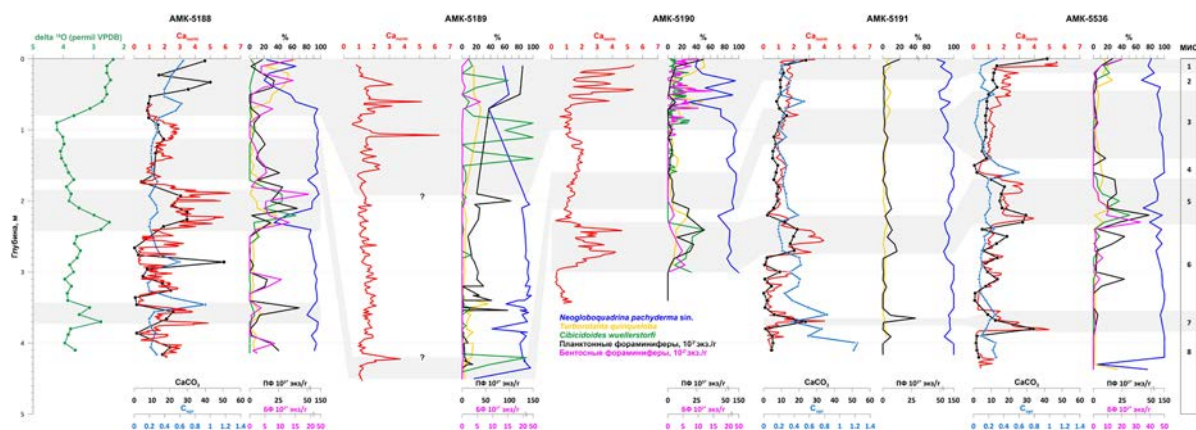


Рис. 2. Распределение основных биогеохимических показателей ($\delta^{18}\text{O}$ для колонки АМК-5188, Ca , CaCO_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$), общей численности (10^3 экз/г) и процентного содержания индикаторных видов ПФ и БФ в колонках донных осадков по профилю через Норвежское море. Серыми полосами показаны тёплые МИС.

и текстуры осадка. Высокая дисперсность сигнала при сканировании бывает обусловлена небольшой площадью датчика и неоднородностью осадка колонки (например, включениями крупных раковин и их обломков или локальными участками аутигенной минерализации). Большая локальная изменчивость может быть характерна и для логов сигналов от элементов, содержащихся в акцессорных минералах тяжёлой подфракции, которые неравномерно распределены в осадке (например, Ti в рутиле, Zr в цирконе, и т.п.). Традиционный метод элементного анализа осадка, который сопровождается трудоёмкой предварительной обработкой, в нашем исследовании позволил подтвердить данные сканирования элементного состава кернов, а также более достоверно оценить количественное соотношение литогенной и биогенной составляющих осадка, скорость захоронения отдельных элементов в осадке и долю аутигенных минералов. Однако дискретность, с которой возможно выполнение традиционных анализов (обычно 1 образец на 5 или 10 см), позволяет выявить изменчивость геохимических параметров только с низким временным разрешением.

В изученных колонках Ca сосредоточен в основном в микрофоссилиях кальцитового состава, а не в алюмосиликатном материале, как показывает значимая отрицательная корреляция между Ca и Al (R^2 от -0.51 до -0.89 , между Ca и Si (R^2 от -0.70 до -0.83), и в меньшей степени, между Ca, Zr и IRD ($R^2=0.37$ и -0.23 , соответственно). Таким образом, отношение содержания литогенных элементов Ti, Al и Zr к биогенному Ca позволяет проследивать изменения основных осадкообразующих компонент. Поэтому для стратиграфии и интерпретации палеоусловий выбраны следующие элементные отношения как признаки поступления терригенного и биогенного вещества в осадки: Ti/Ca (непрерывное линейное сканирование), Zr/Ca и Al/Ca (классический анализ отдельных проб).

Отношение Ti/Ca считается литогенным индикатором: его повышение соответствует увеличению поступления литогенного вещества [18]. Данный параметр часто используется для стратиграфии четвертичных осадков Норвежско-Гренландского бассейна [18], поэтому его применение позволяет сопоставить наши колонки с известными из публикаций разрезами. Повышение Ti/Ca в осадках колонок делает возможным выделение таких стратиграфически важных горизонтов как ледниковые МИС 8, 6 и 4, во время которых в Норвежско-Гренландском бассейне повсеместно зафиксирован рост доли терригенного материала в составе осадков. Для позднего плейстоцена

наиболее выраженный пик Ti/Ca (МИС 4) связан с известным событием Хайнриха 6 (около 60 тыс.л.н.), в то время как последующие этапы усиления поступления айсбергового материала носили менее выраженный характер [9]. При сравнении Ti/Ca в наших колонках по субмеридиональному профилю следует отметить наиболее высокие значения этого показателя во время оледенений на северных станциях АМК-5191 и 5536, расположенных ближе к вероятным областям выноса литогенного материала (рис. 3). Соотношение Al/Ca в морских осадках чаще используется исследователями как показатель речного стока в шельфовых областях Мирового океана, а также как индикатор значительного вклада аэрозольных частиц, например, около побережья в районе Сахары [15]. Тем не менее, можно с уверенностью утверждать, что для открытых частей океана в гумидных областях данный показатель, аналогично Ti/Ca, указывает на вклад терригенного материала, что подтверждается синхронным распределением этих элементных отношений в колонках (рис. 3).

Рост элементного отношения Zr/Ca совпадает с повышением содержания IRD, которое происходит при активизации образования айсбергов во время ледниковых стадий [20]. Отношение Zr/Ca может служить также и показателем накопления крупнозернистой фракции осадка, которое возрастает вследствие увеличения скорости придонных течений. Такое поведение элементного отношения обусловлено тем, что основным носителем Zr служит акцессорный минерал циркон, который отличается удельным весом до 4.7 г/см^3 , высокой твёрдостью (8 единиц по шкале Мооса) и не переносится на дальние расстояния по сравнению с минералами лёгкой подфракции, накапливаясь, подобно кварцу (твёрдость 7 единиц), в песчаной фракции, где преобладают стойкие к физическому выветриванию минералы [17].

В наших колонках пики литогенных индикаторов Ti/Ca, Al/Ca и $100 \cdot \text{Zr/Ca}$ проявляются в большинстве случаев синхронно на фоне максимумов концентраций IRD. Эти элементные отношения наиболее выражены в ледниковых МИС 6 и 8 (рис. 3). При этом во время ледниковых МИС 4 и 6 для колонок АМК-5536, 5189 и 5190 высоким значениям Ti/Ca, Al/Ca и $100 \cdot \text{Zr/Ca}$ соответствуют минимальные концентрации IRD, что наиболее выражено в самой северной колонке профиля (АМК-5536). По-видимому, в течение МИС 4 и 6, литогенный материал поступал в эти колонки не только из конуса выноса Медвежинского желоба [5], но и из локальных источников прилегающих областей СОХ. Отмеченное в наших

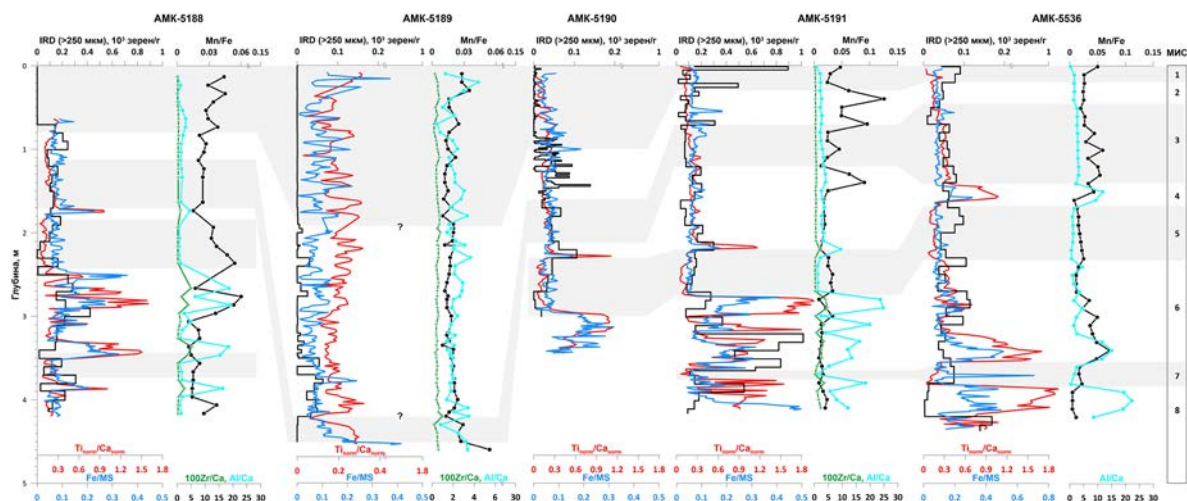


Рис. 3. Распределение основных литогенных (IRD, Ti/Ca, 100Zr/Ca, Al/Ca) и диагенетических (Fe/MS, Mn/Fe) показателей в колонках донных осадков по профилю через Норвежское море. Серыми полосами показаны тёплые МИС.

колонках распределение Ti/Ca, Al/Ca и Zr/Ca имеет сходство с записями ряда литогенных индикаторов (магнитная восприимчивость, Fe/Ca и Al/Ca) в колонках с плато Роколл в северо-восточной части Северной Атлантики [19]. Синфазность вариаций концентрации IRD и содержания литогенных элементов, таких как Si, Al и Ti, распределения которых находятся в противофазе с изменениями $\delta^{18}\text{O}$, CaCO_3 , $\text{SiO}_{2\text{аморф}}$, ранее отмечались нами в пределах МИС 1–6 в колонках из контуритовых дрейфов Снорри и Глория к югу от Исландии [7].

Применение многофункционального показателя процессов литогенеза — Fe/MS — отношение содержания железа в осадках колонки к показателю магнитной восприимчивости [8], впервые было испытано нами в рассматриваемом регионе. Величина магнитной восприимчивости в осадках напрямую зависит от содержания ферромагнитных минералов (преимущественно терригенного происхождения), в то время как диагенетические процессы способствуют перераспределению железа в сульфидные минералы с более низкой магнитной восприимчивостью [12]. Следовательно, пики в отношении Fe/MS могут косвенно указывать на палеограницы изменений окислительно-восстановительных условий осадконакопления в прошлые геологические эпохи, в первую очередь, в периоды повышения потоков ОВ на границах ледниковых эпох [8]. Тем не менее, для уверенного применения данного показателя как косвенного признака диагенеза магнетита и восстановления Fe необходима верификация смены

окислительно-восстановительных условий с помощью других индикаторов. Для большинства колонок профиля изменение показателя Fe/MS происходит синхронно с литогенными индикаторами (Ti/Ca, Al/Ca и 100Zr/Ca), однако в качестве показателя палеограниц окислительно-восстановительных условий мы предлагаем рассматривать пики, совпадающие с относительным увеличением содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в осадках (рис. 2). Такие эпизоды отмечены на границах МИС 7/6 и 5/4, когда происходило накопление ОВ во время наиболее тёплых межстадиалов, которое сопровождалось уменьшением интенсивности водообмена с поверхностными водными массами при замедлении конвекции с наступлением условий стадиалов. Интересно также отметить повышение значений Fe/MS, не связанное с увеличением содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в осадках колонок АМК-5188, 5190 и 5191, где содержание аутигенного железа повышалось в конце самой суровой по ледово-гидрологическим условиям холодной стадии МИС 6 перед началом разрушения ледникового щита. Положение колонки АМК-5536 в области подводного вулканизма и гидротермальной активности в пределах рифтовой зоны СОХ обусловило её особые условия осадконакопления в ряду остальных изученных колонок. В частности, пиковые значения Fe/MS в данной колонке во время стадии МИС 7 связаны с наличием в осадках выраженного прослоя базальтовых стёкол в интервале 370–374 см.

Отношение Mn/Fe используется как индикатор изменения кислородного режима в придонной воде: повышенная кинетика восстановления

марганца по сравнению с железом в условиях дефицита кислорода приводит к уменьшению значения Mn/Fe. Вариации содержания Mn в осадочной толще связаны со скоростями седиментации и соотношением поставки терригенного и биогенного материала: при повышении концентрации последнего усиливается диагенетический “насос” [11]. Это способствует миграции и осаждению Mn на границе восстановленных и окисленных осадков. В исследованных колонках среднее содержание $C_{орг}$ не превышает 1%, что может указывать на относительно слабое участие диагенетических процессов в преобразовании осадков. Распределение Mn/Fe более сложное, чем литогенных индикаторов: повышенные значения характерны для осадков не только межледниковий МИС 1, 3 и 5, но и ледниковых стадий МИС 2, 4 и 6 (рис. 3). Абсолютный максимум Mn/Fe 0.126 найден в колонке АМК-5191 (в разрезе горизонт 40 см) на границе МИС 1/2 при величине $C_{орг}$ 0.55%. В других колонках рост Mn/Fe замечен на границах межстадий и стадий. Минимум Mn/Fe зафиксирован в колонке АМК-5191 (в разрезе уровень 400 см) (МИС 8) при максимальном содержании $C_{орг}$ 1.2% (рис. 2 и 3). Повышенные значения Mn/Fe характерны для осадков с пониженным содержанием $C_{орг}$, где, по-видимому, преобладали более выраженные окислительные условия. Принимая во внимание, что в большинстве случаев $C_{орг}$ распределяется по колонке асинхронно с $CaCO_3$ и Ca (рис. 2), можно допустить, что высокие значения Mn/Fe обусловлены свойством Mn к повышенной адсорбции на кальцитовых раковинах фораминифер. В большинстве случаев Mn/Fe изменяется в противофазе с литогенными индикаторами, что наиболее выражено для Al/Ca (рис. 3). Исключение составляет колонка АМК-5536, где синхронность пиков Mn/Fe и Fe/MS, Ti/Ca и Al/

Ca во время ледниковых МИС 4 и 6, может обуславливаться поступлением осадочного материала (вулканогенного и гидротермального), качественно и количественно отличающегося от других исследуемых колонок.

Изменчивость средних значений элементных отношений в изученных колонках позволила выявить следующие общие признаки стратиграфических уровней (табл. 2). В осадках конца позднего плейстоцена и голоцена в пределах МИС 1–3 осреднённые для интервала каждой МИС значения Al/Ca, Zr/Ca и Mn/Fe почти не меняются, а величина Al/Ca остается низкой. Литогенные индикаторы Al/Ca, Ti/Ca и Zr/Ca имеют самые высокие средние значения в ледниковых МИС 4, 6 и 8 в конце среднего плейстоцена (в 5 и 6 раз выше по сравнению с интервалом МИС 1–3, соответственно). Напротив, величина Mn/Fe снижается в МИС 6–8 от более высокого значения в МИС 1–3. Показатель диагенетического преобразования осадков Fe/MS повышается синхронно с содержанием ОВ во время среднего плейстоцена МИС 8–6, а также в позднем плейстоцене во время МИС 4. Межледниковая стадия МИС 5 отличается по всем показателям наиболее сильно и характеризуется самыми низкими значениями литогенных отношений Al/Ca и Zr/Ca для всего изученного интервала времени. Средние значения для биогенных показателей Ca и $CaCO_3$ закономерно максимальны во время теплых межстадий МИС 1, 5 и 7. Наиболее индикативными для района исследования служат литогенные палеоиндикаторы Ti/Ca, Al/Ca и Zr/Ca, вариативность средних значений которых в пределах МИС 1–8 значительно выше, чем Fe/MS и Mn/Fe (6 и 2 раза соответственно) (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения литолого-геохимических индикаторов в осадках выделенных МИС. Жирным шрифтом выделены повышенные значения

МИС	Al/Ca	Zr/Ca	Mn/Fe	Ti/Ca	Fe/MS	Ca _{norm}	CaCO ₃	C _{орг}
1	1.550	0.003	0.033	0.175	0.073	2.09	21.38	0.33
2	1.750	0.004	0.033	0.149	0.077	1.95	10.85	0.25
3	1.920	0.004	0.030	0.220	0.080	1.36	9.66	0.20
4	4.700	0.006	0.027	0.435	0.100	1.08	4.71	0.32
5	1.070	0.003	0.030	0.137	0.069	2.68	19.05	0.23
6	9.790	0.019	0.025	0.688	0.166	0.86	7.98	0.31
7	3.660	0.011	0.016	0.290	0.115	2.07	18.50	0.35
8	10.310	0.016	0.016	0.796	0.181	0.94	5.82	0.47

ВЫВОДЫ

→ По всему субмеридиональному профилю, представленному пятью колонками, отмечены противоположные тренды в изменении биогенных (теплолюбивые виды фораминифер и содержание CaCO_3) и литогенных (IRD, отношения Ti/Ca , Al/Ca и Zr/Ca) палеомаркеров и их асинхронное чередование. В межледниковые периоды более благоприятные условия среды осадкообразования способствовали росту и даже преобладанию биогенных компонентов, что отразилось в возрастании содержания CaCO_3 на фоне резкого сокращения литогенных показателей. Напротив, в периоды похолодания усиливалось поступление терригенного материала, которое маркируется пиками IRD, Ti/Ca , Al/Ca и Zr/Ca , наиболее выраженное в осадках, сформированных в периоды МИС 6 и 8.

→ Интенсивность поступления терригенного материала была больше во время оледенений МИС 8 и 6 по сравнению с эпохой оледенения МИС 4–2 в центральных и северных районах Норвежского моря.

→ По геохимическим показателям (Fe/MS и Mn/Fe) процессы диагенетического преобразования осадка активировались во время ледниковых эпох, которым предшествовали периоды интенсивного накопления автохтонного ОВ во время межстадиалов. Наиболее выраженная редокс-стратификация осадочной толщи наблюдалась на границах МИС 7/6 и 5/4.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны экипажу НИС “Академик Мстислав Келдыш”, А. И. Мамочкиной, Г. В. Малафееву и С. М. Исаченко за помощь в отборе проб осадков, А. А. Ключиткину за всестороннее содействие. Также авторы искренне благодарят двух анонимных рецензентов, замечания и комментарии которых помогли существенно улучшить статью.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Госзадания (тема № FMWE-2024-0020 — отбор осадков, геохимические исследования) и гранта РНФ № 24-17-00044, <https://rscf.ru/project/24-17-00044/> (исследование состава планктонных и бентосных фораминифер, подсчет зёрен ледового разнота).

Все материалы статьи хранятся в ИО РАН и доступны по аргументированному запросу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисицын А.П. Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли / Мировой океан. Т. II. Физика, химия и биология океана. Осадкообразование в океане и взаимодействие геосфер Земли. Под общ. ред. чл.-корр. РАН Л.И. Лобковского и академика Р.И. Нигматулина. Москва: Научный мир, 2014. С. 331–571.
2. Матюль А.Г., Новичкова Е.А., Чеховская М.П., и др. Сравнение природных условий последнего межледниковья и голоцена в Лофотенской котловине (Норвежское море) // Океанология. 2024. Т. 64. № 6. С. 869–876.
3. Bauch H.A., Erlenkeuser H. Interpreting glacial-interglacial changes in ice volume and climate from subarctic deep water foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ / Earth's Climate and Orbital Eccentricity: The Marine Isotope Stage 11 Question, Geophysics Monography Series. Droxler A.W., Poore R.Z., Burckle L.H. (eds.). Washington, D.C.: American Geophysical Union, 2003. V. 137. P. 87–102.
4. Blindheim J., Rey F. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s // ICES Journal of Marine Science. 2004. № 61. P. 846–863.
5. Bruvoll V., Breivik A. J., Mjelde R., et al. Burial of the Mohn-Knipovich seafloor spreading ridge by the Bear Island Fan: Time constraints on tectonic evolution from seismic stratigraphy // Tectonics. 2009. V. 28. N 4. TC4001.
6. 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 // Marine Micropaleontology. 2018. № 139. P. 84–101.
7. Demina L.L., Novichkova E.A., Lisitsyn A.P., et al. Geochemical signatures of paleoclimate changes in the sediment cores from the Gloria and Snorri Drifts (Northwest Atlantic) over the Holocene-Mid Pleistocene // Geosciences. 2019. № 9. P. 432.
8. Funk J.A., von Döbeneck T., Reitz A. Integrated rock magnetic and geochemical quantification of redoxomorphic iron mineral diagenesis in Late Quaternary sediments from the Equatorial Atlantic / The South Atlantic in the Late Quaternary. Wefer G., Mulitz S., Ratmeyer V. (eds). Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. P. 237–260.
9. Hemming S.R. Heinrich events: Massive Late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint // Reviews of Geophysics. 2004. V. 42. P. 1–43.

10. *Jakobsson M., Andreassen K., Bjarnadóttir L.R., et al.* Arctic Ocean glacial history // *Quaternary Science Reviews*. 2014. № 92. P. 40–67.
11. *Jarvis I., Murphy A.M., Gale A.S.* Geochemistry of pelagic and hemipelagic carbonates: criteria for identifying system tracts and sea-level change // *Journal of Geological Society*. 2001. № 158. P. 685–696.
12. *Johnson J.E., Phillips S.C., Clyde W.C., et al.* Isolating detrital and diagenetic signals in magnetic susceptibility records from methane-bearing marine sediments // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2021. № 22. P. 21.
13. *Kylander M.E., Ampel L., Wohlfarth, B., et al.* High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies // *Journal of Quaternary Science*. 2011. № 26. P. 109–117.
14. *Nees S., Struck U.* The biostratigraphic and paleoceanographic significance of *Siphonotextularia rolshauseni* Phleger and Parker in Norwegian-Greenland Sea sediments // *Journal of Foraminiferal Research*. 1994. № 24. P. 233–240.
15. *Nizou J., Hanebuth T.J.J., Vogt C.* Deciphering signals of late Holocene fluvial and aeolian supply from a shelf sediment depocenter off Senegal (north-west Africa) // *Journal of Quaternary Science*. 2011. № 26. P. 411–421.
16. *Olsen, L., Sveian, H., Bergström, B., et al.* Quaternary glaciations and their variations in Norway and on the Norwegian continental shelf // *NGE*. 2013. P. 27–78.
17. *Rudnick R. L., Gao S.* Composition of the continental crust / *Treatise on Geochemistry*. Holland H.D., Turekian K.K. (eds.). Amsterdam: Elsevier Pergamon, 2004. V. 3. P. 1–64.
18. *Sabine M., Eynaud F., Zaragosi S., et al.* Stratigraphy in the Greenland/Iceland/Norwegian (GIN) Seas: A multiproxy approach on Pleistocene sediments // *Stratigraphy & Timescales*. 2022. № 7. P. 37–80.
19. *Sayago-Gil M., López-González N., Long D., et al.* Multi-proxy approach for identifying Heinrich events in sediment cores from Hatton Bank (NE Atlantic Ocean) // *Geosciences*. 2020. № 10. P. 1–24.
20. *Winkelmann D., Schafer C., Stein R., et al.* Terrigenous events and climate history of the Sophia Basin, Arctic Ocean // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. № 9.

MIDDLE TO LATE QUATERNARY STRATIGRAPHY AND SEDIMENTATION PALEOENVIRONMENT OF THE NORWEGIAN SEA BASED ON A PALEOMARKER

**E. A. Novichkova^{a, #}, L. L. Demina^a, D. P. Starodymova^a, A. G. Matul^a,
M. D. Kravchishina^a, M. P. Chehovskaia^a, N. S. Oskina^a, L. A. Lozinskaia^a,
S. V. Slomnyuk^a, A. S. Solomatina^a, K. S. Iakimova^a**

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

[#]*E-mail: enovichkova@mail.ru*

A complex of sedimentological, geochemical and micropaleontological methods was used to study and compare five new sediment cores on a submeridional profile from the middle to the north of the Norwegian Sea. A combined analysis of the distribution of ice-rafted debris, polar/subpolar foraminifera, calcium carbonate, organic carbon and continuous geochemical scanning records revealed an alternation of mid to late Late Quaternary glacial and interglacial intervals during the last 260,000 years. In the Late Middle Pleistocene glaciation (MIS 6, 8), the supply of terrigenous material had a much greater influence on regional sedimentation than in the Late Pleistocene ((MIS 2–4) Local (between the center and north of the Norwegian Sea) differences in glacial and interglacial sedimentation are shown.

Keywords: North Atlantic, Pleistocene, lithological, geochemical and micropaleontological paleomarkers, stratigraphy of the Norwegian-Greenland basin