

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт океанологии им. П.П. Ширшова
Российской академии наук**

На правах рукописи

ЛОЗИНСКАЯ

Любовь Андреевна

**Палеоэкология бентосных фораминифер и средне-
позднечетвертичная палеоокеанология Норвежско-Гренландского
бассейна и прилегающих районов**

Специальность: 1.6.17 – «Океанология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в лаборатории палеоэкологии и биостратиграфии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук.

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией палеоэкологии и биостратиграфии ФГБУН Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук

Матуль Александр Геннадьевич

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, главный научный сотрудник, доцент, профессор кафедры геоморфологии и палеогеографии, заведующий лабораторией новейших отложений и палеогеографии плейстоцена Географического факультета ФГБУН Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Янина Тамара Алексеевна

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории седиментологии и стратиграфии ФГБУН Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Плетнев Сергей Павлович

Ведущая организация:

Геологический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Защита состоится « » _____ г. в ____ ч __ мин на заседании диссертационного совета 24.1.090.03 (Д 002.239.03) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук по адресу: Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, 117997.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.disser.ocean.ru> Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук Института.

Автореферат диссертации разослан « » _____ 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат геолого-минералогических наук

Политова Надежда Вячеславовна

Актуальность работы. Северная (в основном, субарктическая) часть Атлантического океана (субарктическая Северная Атлантика – ССА) и Норвежско-Гренландский бассейн (НГБ) являются районами активных работ по морской геологии и четвертичной палеоокеанологии для решения фундаментальных проблем по современному состоянию и истории климата, терригенного/биогенного осадконакопления и природных систем. Современное (межледниковое) осадконакопление в ССА и НГБ преимущественно терригенное (преобладает пелит) со значительной долей биогенного карбоната кальция в зонах сильного влияния теплых умеренных водных масс (Новичкова и др., 2019). В интервалах четвертичных оледенений в ССА и НГБ существенно менялся облик термохалинной циркуляции, параметры и распространение водных масс (Telesiński et al., 2015; Лукашина, 2018). На дне накапливались большие массы крупнозернистого материала ледового разноса, а поступление биогенного вещества в осадки сокращалось или даже прекращалось из-за ухудшения условий для местных водных и донных экосистем (Бараш и др., 1987; Rasmussen and Thomsen, 2017). Региональные изменения четвертичного времени в ССА и НГБ, важных районах формирования глобального океанского конвейера, имели океанологический отклик во многих удаленных областях Мирового океана.

Седиментологические и микропалеонтологические данные по морским отложениям используются как индикаторы палеоокеанологических событий (Лисицын, 1981; Bauch et al., 2001b; Risebrobakken et al., 2003; Telesiński et al., 2014). Бентосные фораминиферы (БФ) являются одной из самых распространённых групп донных одноклеточных организмов Мирового океана и важным компонентом биогенной карбонатной седиментации. Сообщества БФ чувствительны к изменениям как поверхностных, так и придонных водных масс. Они отражают колебания биопродуктивности в эуфотическом слое, процессы поступления органического вещества (ОВ) на дно, свойства придонной воды, изменение геохимического состава осадков (Jorissen et al., 2007). В связи с этим анализ количественного распределения, состава сообществ и отдельных характерных видов БФ широко используется для мониторинга современного экологического состояния водоемов и реконструкции условий окружающей среды в геологическом прошлом (Thomas et al., 1995; Bauch et al., 2001a; Lintner et al., 2021).

В НГБ и ССА можно выделить как хорошо исследованные так, и малоизученные районы. Хорошо исследованные районы включают в себя Исландское море, Норвежскую котловину, шельф Норвежского моря и о. Шпицберген, а также пролив Фрама (например, Struck, 1995; Былинская и Головина, 2012; Bauch et al., 2012). Они привлекают внимание ученых в связи с высокими скоростями осадконакопления, в которых фиксируются резкие, короткие, и иногда кризисные климатические события (в частности, Средневековая климатическая аномалия, Малый ледниковый период, Современное «Индустриальное» потепление). Глубоководные части Гренландского моря, Лофотенской котловины, северные области Срединно-Атлантического хребта и мелководные районы проливов (Датский, Фарерско-Шетландский и Фарерско-Исландский) пока остаются малоизученными (например, Klitgaard-Kristensen et al., 2001; Slubowska-Woldengen et al., 2008; Telesiński et al., 2015). Данные области характеризуются низкими скоростями осадконакопления, а также сложным пересеченным рельефом и

многообразием седиментологических обстановок, обусловленным широким развитием гравитационных процессов (например, образованием подводных оползней), из-за чего вскрыть однородную колонку с ненарушенной последовательностью слоев становится сложной задачей.

Данная диссертационная работа продолжает и дополняет исследования, направленные на более глубокое понимание местных особенностей четвертичной палеоокеанологии ССА и НГБ. При этом, следуя современному методическому подходу, микропалеонтологический анализ (данные соискателя) проводится в сочетании с литологическими, изотопными, геохронологическими (данные коллег с участием соискателя) исследованиями, что позволяет получить надежные выводы по палеоокеанологии изучаемого региона.

Актуальность диссертации соответствует Направлению Н6 из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642) «Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем, а также занятия и удержания лидерских позиций в создании международных транспортно-логистических систем, освоении и использовании космического и воздушного пространства, Мирового океана, Арктики и Антарктики», а также научному обоснованию Госзадания ИО РАН по теме № FMWE-2021-0006, гранта РФФИ № 21-17-00235 и гранта РФФИ № 20-35-90093.

Целью работы являлось стратиграфическое расчленение, корреляция плейстоцен-голоценовых отложений и реконструкция четвертичных обстановок в Норвежско-Гренландском бассейне и прилегающих районах (проливах в Северную Атлантику) по комплексу палеоокеанологических индикаторов в сопоставлении с опубликованными ранее данными.

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Анализ таксономического состава и количественного распределения сообществ БФ в донных отложениях.
2. Статистический анализ первичных количественных данных по составу сообществ БФ.
3. Палеоэкологическая интерпретация распределения комплексов БФ на основе сведений о современной экологии видов. Дополнение экологической информации по обнаружению видов БФ в интервалах определенных климатических обстановок.
4. Палеоокеанологическая реконструкция по изученным разрезам отложений. Корреляция собственных результатов с опубликованными материалами по глобальным и региональным архивам четвертичного палеоклимата.

Научная новизна. Впервые удалось выполнить реконструкции по комплексному анализу (включая детальный микропалеонтологический анализ БФ) колонок из малоизученных районов: ЮЗ часть абиссальной равнины Лофотенской котловины, СВ окончание хр. Мона, восточный склон хр. Книповича, континентальный склон о. Исландии в Датском проливе и западная часть шельфа Великобритании (бассейн Уэстрей). Работа дополняет реконструкции условий осадконакопления и дает новые палеоэкологические и палеоокеанологические сведения для отдельных районов ССА и НГБ.

Ряд разрезов отложений проанализирован с детальностью 1 см, что ранее было редким в

практике региональной микропалеонтологии. В результате установлено, что изучение колонок с разрешением 1–2 см позволяет надежно зафиксировать кратковременные изменения условий среды, которые не удастся обнаружить при исследовании колонок с более низким, традиционно используемым разрешением 5–10 см.

Впервые проведен статистический анализ (методами кластеризации, главных компонент и неметрического многомерного масштабирования), основанный на первичных данных по количественному распределению БФ в разных по охвату геологического времени разрезах отложений в НГБ и ССА. В предыдущих работах данный анализ, имеющий множество алгоритмов вычисления, проводился, в основном, для исследований современного распределения сообществ БФ. Полученные результаты продемонстрировали, что из 12 вариантов статистической обработки первичных данных БФ только четыре алгоритма статистического анализа наиболее эффективны для стратиграфических построений. Они позволили подтвердить климатостратиграфические границы в колонках, определить сходство и различие сообществ БФ из разных временных интервалов.

Уточнено стратиграфическое положение находок видов *Pullenia bulloides* (d'Orbigny, 1846) и *Siphotextularia rolshauseni* (Phleger & Parker, 1951) в позднечетвертичных отложениях НГБ, определены временные интервалы их наибольшей концентрации, проанализированы ограничения в использовании присутствия вида *P. bulloides* в качестве стратиграфически важного таксона. Дополнены сведения об экологии некоторых таксонов, которые ранее мало упоминались при описании разрезов из-за общепринятого мнения об их оппортунистическом образе жизни в холодноводных районах. Установлено, что они могут служить «реперами» в реконструкциях четвертичного периода.

Анализ количественного распределения видов *Epistominella exigua* (Brady, 1884) и *Oridorsalis umbonatus* (Reuss, 1851), а также *Cibicidoides wuellerstorfi* (Schwager, 1866) и *Ioanella tumidula* (Brady, 1884), впервые выявил характер их соотношения в сообществах БФ в четвертичное время. Доминирующий вид *O. umbonatus* в сообществе инфауны указывает на формирование высокого и постоянного в течение года потока ОВ на дно в области, где преобладают поверхностные атлантические течения. Смена доминирующего таксона на *E. exigua* свидетельствует об увеличении уровня продуктивности в бассейне и усилении сезонности в поступлении ОВ, обусловленных смещением высокопродуктивной зоны у Арктического фронта в район исследования. В сообществе эпифауны виды *C. wuellerstorfi* и *I. tumidula* отражают свободные ото льда условия. Однако таксон *C. wuellerstorfi* предпочитает гидродинамически активные придонные обстановки и избегает условия низкого содержания кислорода, а вид *I. tumidula* приурочен к более спокойным гидродинамическим придонным обстановкам и устойчив к колебаниям содержания кислорода в придонном слое.

В мелководном районе Датского пролива на основе корреляции данных магнитной восприимчивости (МВ), предположительно, впервые выделены отложения с возрастом более 60 тыс. лет.

Впервые по видам-индикаторам БФ реконструированы события притока теплых

атлантических вод в ЮЗ часть НГБ в позднечетвертичное время. Ранее эти закономерности фиксировали по соотношению видов планктонных фораминифер (ПФ).

По комплексам БФ и ПФ установлено, что в среднем плейстоцене атлантические водные массы могли проникать в НГБ преимущественно через Исландско-Шетландский порог, в то время как через Датский пролив они не поступали. В позднем плейстоцене поток атлантической воды, вероятно, усилился и сместился к Исландии.

Впервые представлены атласы с фотографиями видов БФ с использованием высококачественного оптического оборудования и автоматического фокус-стекинга при фотосъемке. Микрофотографии отображают натуральный цвет и демонстрируют различные таксономические признаки (четкую форму устья и поверхностную структуру раковин), наблюдаемые при рутинной работе с микроскопом. Опубликованные в виде статей, эти атласы пользуются вниманием коллег-микрорепалеонтологов: в базе публикаций ResearchGate их индексы интереса Research Interest Score выше, чем у 75–78 % всех публикаций базы.

Теоретическая и практическая значимость. Выполненные исследования развивают сам метод микрорепалеонтологического анализа БФ. На большом фактическом материале сделана детальная таксономическая работа с созданием атласов по видам БФ. Предложенный подход к статистической обработке первичных данных позволяет продвинуться в унификации методики по климатостратиграфии и палеоэкологической интерпретации на основе большого объема данных по БФ. Микрорепалеонтологические результаты встраиваются в мультидисциплинарные исследования новых разрезов плейстоцен-голоценовых отложений ССА и НГБ. Детальные палеоокеанологические реконструкции распространяются на малоизученные районы, в частности, глубоководные СВ и ЮЗ части Лофотенской котловины и мелководные районы Датского пролива и Шотландии.

Выделенные в работе закономерности распределения сообществ и таксонов БФ, характерных для разных палеоклиматических обстановок, могут использоваться для реконструкции плейстоцен-голоценовых условий осадконакопления. Коллекция и фотографии видов БФ найдут применение в рутинной работе по изучению отложений ССА и НГБ, а также в обучении студентов ВУЗов по соответствующим специальностям.

Часть результатов работы вошли в научные отчеты по Госзаданию ИО РАН (№ FMWE-2021–0006), грантам РФФИ (№ 21–17–00235, № 16–47–02009) и РФФИ (№ 20–35–90093).

Защищаемые положения

1. Два глубоководных доминирующих сообщества являются индикаторами природных условий Норвежско-Гренландского бассейна в среднеплейстоцен-голоценовое время: смена преобладающего вида в сообществе инфауны *Epistominella exigua-Oridorsalis umbonatus* связана с биопродуктивностью поверхностных вод и периодичностью поступления органического вещества на дно в зависимости от положения Арктического фронта и распространения атлантических вод, а в сообществе эпифауны *Cibicidoides wuellerstorfi-Ioanella tumidula* – с колебаниями содержания кислорода на дне и интенсивностью глубинных/придонных течений.
2. Статистическая обработка первичных данных по бентосным фораминиферам с

использованием методов стратиграфической и групповой кластеризации эффективна в определении основных климатостратиграфических границ и детализации палеозаписей в осадочных разрезах. Данный подход позволяет получить дополнительные сведения о палеоэкологии видов-оппортунистов по статистическому объединению в группы таксонов с известной экологией.

3. Для предпоследнего (МИС 6) и последнего (МИС 2) оледенений в северо-восточной части Норвежско-Гренландского бассейна по комплексам бентосных фораминифер реконструированы нормально-морские и сезонно свободные ото льда условия, а также сохраняющийся приток теплых поверхностных вод из Северной Атлантики.

4. По данным распределения фораминифер в среднем плейстоцене теплые атлантические поверхностные водные массы могли поступать в Норвежско-Гренландского бассейн, в основном, через Исландско-Фарерско-Шетландский порог, а в позднем плейстоцене и голоцене поток атлантической воды, вероятно, смещался к западу на Гренландско-Исландский порог. В Датском проливе во время МИС 5 предполагается проникновение как холодных полярных/арктических поверхностных водных масс в субполярную часть Атлантики, так и теплых атлантических поверхностных вод в Норвежско-Гренландской бассейн.

Объекты исследования. В диссертации изучены новые разрезы донных отложений из северо-восточной части Срединно-Атлантического хребта, абиссальной равнины и континентального подножия Лофотенской котловины, северо-западного континентального склона Исландии в Датском проливе и северо-западного шельфа Великобритании.

Фактический материал. Диссертационная работа основана на материалах, полученных в нескольких экспедициях Института океанологии имени П.П. Ширшова РАН: 62-й, 68-й, 71-й и 75-й рейсы научно-исследовательского судна «Академик Мстислав Келдыш» по комплексному изучению природной системы ССА и НГБ.

Изучены десять колонок, из которых пять коротких разрезов отобраны мультикорером и дночерпателем, пять длинных – ударной трубкой большого диаметра. БФ проанализированы в 577 образцах. Во фракции >63 мкм подсчитано ~150000 раковин и определено 166 таксонов БФ, относящихся к 89 родам. В работу включены также подсчёты видов ПФ во фракции >125 мкм, выполненные М.П. Чеховской. Подсчет зерен ледового разноса (ice-rafted debris IRD) во фракциях >100, >125 и >200 мкм выполняли автор диссертации и, в ряде проб, М.П. Чеховская.

Литологическое описание, предварительные сведения из отчетов по рейсам, измерения магнитной восприимчивости (МВ), данные гранулометрического, изотопного ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$), радиоуглеродного (AMS ^{14}C) и геохимического (CaCO_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$) анализов любезно предоставлены Е.А. Новичковой и М.Д. Кравчишиной.

Методология. Комплексность работы заключалась в применении разных методов анализа к одним и тем же разрезам и пробам осадков: микропалеонтологического, статистического, климатостратиграфического, подсчета IRD (данные соискателя), а также литологического, гранулометрического, геохимического (CaCO_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$), изотопного ($\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$), измерения МВ и определения абсолютного возраста осадков с помощью радиоуглеродного датирования (данные

коллег).

Личный вклад автора. Автор лично провела отбор мокрых проб и промывку сухих образцов морских осадков в лаборатории. Она выполнила подсчет IRD в большинстве проб, определила количественный и таксономический состав БФ во всех исследованных образцах. Всего проанализировано 577 проб осадков из 10 колонок. Соискатель участвовала в отборе раковин ПФ на радиоуглеродные датировки и анализ стабильных изотопов кислорода и углерода. Она собрала коллекцию видов БФ из отложений ССА и НГБ, сфотографировала раковины и обработала их изображения в графических редакторах. Автор самостоятельно провела сопоставление результатов микропалеонтологического, седиментологического и геохимического анализов, обработала результаты статистического анализа, выделила климатостратиграфические интервалы, интерпретировала первичные данные и выполнила палеоокеанологические реконструкции.

Достоверность полученных результатов. Данные по количественному подсчету и видовому составу БФ в отложениях НГБ и прилегающих районов проливов получены в соответствии с принятыми в мировой практике стандартами анализа проб донных осадков с использованием современного аналитического оборудования в лабораториях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена (1) обширным фактическим материалом и его обработкой общепринятыми современными методами, (2) презентациями и обсуждением на различных семинарах и коллоквиумах, российских и международных конференциях, а также в опубликованных статьях.

Апробация работы. Результаты работы представлены лично соискателем на VI Всероссийской научной конференции молодых ученых (Москва, 2021), конференции Генеральной ассамблеи Европейского союза по геонаукам (EGU General Assembly 2021), X международной научной конференции молодых ученых "Молодые - Наукам о Земле" (Москва, 2022), XXIV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии (Москва, 2022), конференции Экзолит–2022 (Москва, 2022), конференции «Динамика экосистем в голоцене» (Санкт-Петербург, 2022), XVI Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле» (Москва, 2023), VII Всероссийской научной конференции молодых ученых (Санкт-Петербург, 2023), XVIII Международной научной конференции диатомологов «Диатомовые водоросли: морфология, биология, систематика, экология, флористика, палеогеография, биостратиграфия» (Апатиты, 2023), X международном совещании «Литогенез и минерагения осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии» (Воронеж, 2023).

Публикации. По материалам работы опубликовано пять статей в журналах, которые входят в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК (WoS, Scopus), и десять материалов и тезисов докладов в сборниках конференций.

Объём и структура работы. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка видов фораминифер, списка литературы и двух приложений. Общий объем работы составляет

237 страниц. В тексте содержится 48 рисунков и три таблицы. В списке литературы 163 наименования. Приложение I включает десять графических иллюстраций результатов статистического анализа, десять фототаблиц с фотографиями видов БФ. Приложение II включает десять таблиц с подсчетами видов БФ в колонках.

Благодарности. Автор благодарит своего научного руководителя Александра Геннадьевича Матуля за руководство и за внимание, уделенное этой диссертационной работе. Огромная благодарность С.А. Корсуну, А.В. Тихоновой, М.П. Чеховской, Х.М. Саидовой, Е.А. Овсепян и Т.А. Хусид, за обучение и помощь в определении видов фораминифер, за плодотворные дискуссии и полезные консультации. Отдельную искреннюю благодарность автор выражает Л.Ф. Копаевич, которая направила соискателя на путь микропалеонтологии и внесла большой вклад в написание дипломных и научных работ. Спасибо большое за помощь, предоставление материалов и дополнительных данных Е.А. Новичковой. Автор признательна М.Д. Кравчишиной, А. Клювиткину, А. Новигатскому, Н.В. Козиной и другим сотрудникам лаборатории физико-геологических исследований им. А.П. Лисицына и аналитической лаборатории ИО РАН за совместную работу и всестороннюю поддержку. Кроме того, за активное сотрудничество и возможность участия в рейсах в Арктику, что сильно повысило опыт соискателя, огромное спасибо А.С. Ульяновцу. Также автор выражает благодарность экипажу и участникам научных экспедиций на НИС «Академик Мстислав Келдыш», без которых эта работа не смогла бы состояться.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цели и задачи исследований, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приводится краткая характеристика материала исследования и личного вклада автора, сведения по апробации и структуре работы.

Глава 1. Физико-географическая характеристика района НГБ и ССА

В главе для района исследования – НГБ и ССА – дана краткая характеристика геологического и геоморфологического строения бассейнов, гидрологического режима в зависимости от типов водных масс, а также особенности распределения состава поверхностного осадочного материала, первичной биологической продуктивности и типов биогеохимических провинций.

Глава 2. Литературный обзор по исследованиям бентосных фораминифер в НГБ и ССА

Проанализированы публикации, посвященные важным экологическим особенностям и предпочтениям основных видов и сообществ БФ, определенных в процессе работы над диссертацией. **Раздел 2.1** включает обширные исследования экологии БФ в НГБ и ССА, которые начались в 1980-х гг. В результате получены основные сведения о закономерностях распределения сообществ БФ в зависимости от климата (Саидова, 1976; 2003; Sejrup et al., 2004), батиметрии (Belanger and Streeter, 1980; Mackensen et al., 1985), интенсивности придонных течений (Лукашина, 2008; Gottschalk et al., 2016), содержания кислорода вблизи дна (Alve, 1994;

Rathmann and Kuhnert, 2008), потока ОБ на дно (Eichler et al., 2014; Кулешова и Пономаренко, 2018) и других обстановок окружающей среды. В **разделе 2.2.** приведены исследования, где комплексы ПФ, БФ и другие палеоокеанологические индикаторы используются для реконструкции четвертичных обстановок. Основные результаты по распределению ПФ и БФ в НГБ внесли Х.А. Баух (Bauch, 1997; Bauch and Helmke, 1999; Bauch et al., 1999; Bauch et al., 2001a; 2001b и др.), У. Штрук (Struck, 1995; Struck, 1997), Т. Расмуссен (Rasmussen et al., 2007; Rasmussen et al., 2014; Rasmussen and Thomsen, 2017) и Е. Томас (Thomas et al., 1995). Также эти и ряд других работ (Dokken and Jansen, 1999; Левитан и др., 2005; Telesiński et al., 2014; Иванова и Мурдмаа, 2021 и др.) включают седиментологические, изотопные и геохимические данные, которые используются для региональной корреляции колонок.

Глава 3. Материалы и методы

Материал для работы представляет собой колонки донных осадков, отобранные ударной гравитационной трубкой большого диаметра (ТБД), мультикорером (МК) и дночерпателем (ДЧ) в экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН): 62-й, 68-й, 71-й, 75-й рейсы НИС «Академик Мстислав Келдыш». На рис. 1 показано местоположение изученных станций.

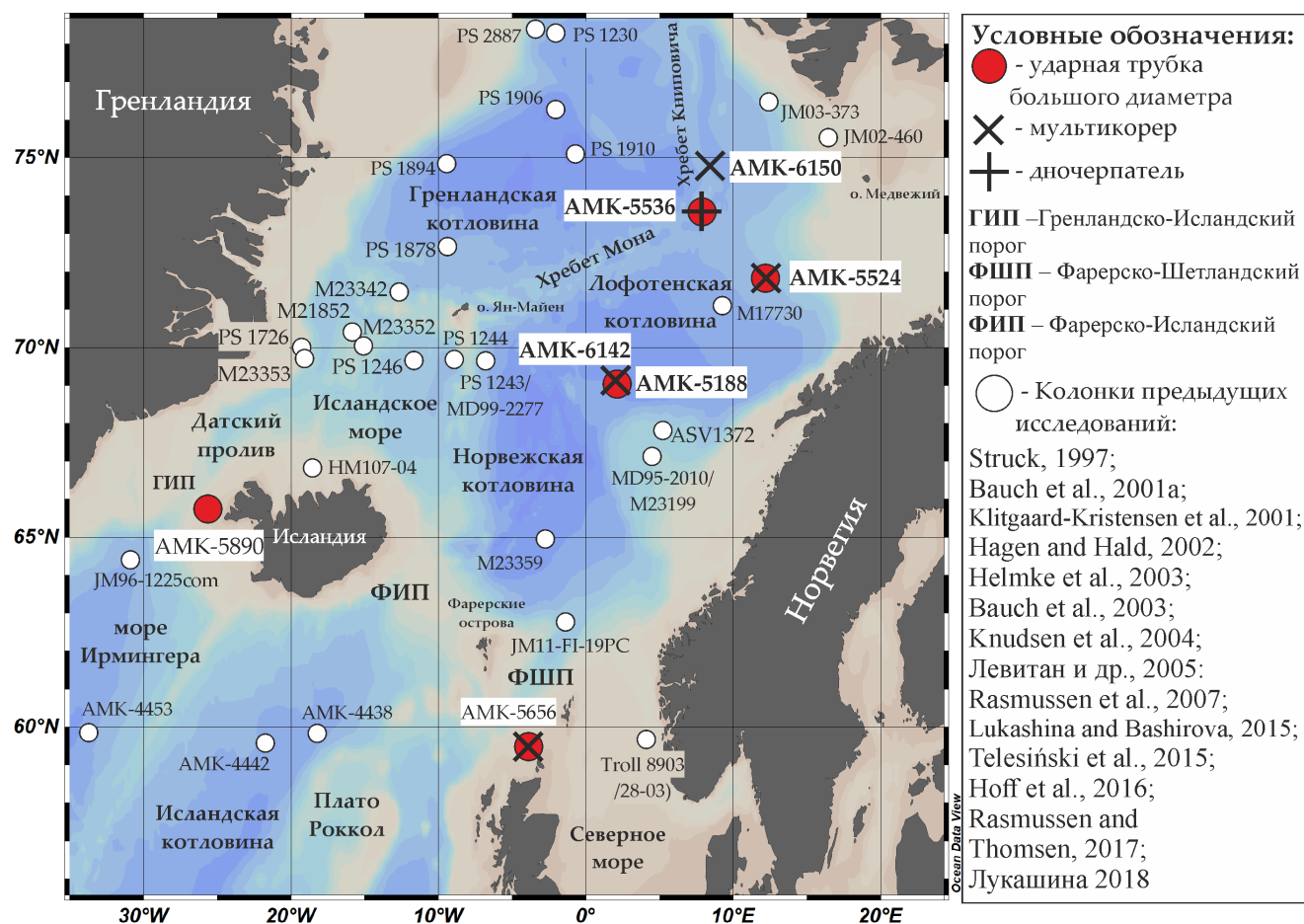


Рисунок 1. – Карта расположения изученных станций в НГБ и ССА.

Список изученных станций, их координаты, глубина моря, длина колонок, частота отбора и общее количество проб для микропалеонтологического анализа даны в **разделе 3.1.**

Раздел 3.2 раскрывает методологию микропалеонтологического анализа, где сухой промытый осадок помещали на черную пластину и делили на сплиты, а затем в пробе насчитывали не менее 150–300 раковин (Fatela and Taborda, 2002; Schönfeld et al., 2012). Также автором диссертации вместе с коллегами составлены коллекции таксонов и микрофотографий БФ из колонок в ССА, НГБ и арктических морей. Атласы микрофотографий БФ представлены в Приложении I в тексте диссертации.

Хронология изученных колонок представлена в **разделе 3.3**. Датировки абсолютного возраста (всего 22 C^{14}) получены методом ускорительной масс-спектрометрии (AMS). Стратиграфическое расчленение колонок, проводилось путем сопоставления изотопно-кислородных данных (147 пробы $\delta^{18}O$) со стандартной кривой LR04 (Lisiecki and Raymo, 2005) с выделением климатостратиграфических интервалов морских изотопных стадий (МИС). Методика и список лабораторий, где проанализированы C^{14} и $\delta^{18}O$, представлены в тексте диссертации.

Дополнительными стратиграфическими маркерами служили (а) записи MB и их корреляция с колонками предыдущих исследований MD99-2277 (Helmke et al., 2003), MD95-2010 (Dokken and Jansen, 1999) и JM96-1225 (Hagen, Hald, 2002) (б) данные содержания карбоната кальция ($CaCO_3$) (в) присутствие видов БФ, распределение которых имеет четкую возрастную привязку (Naake et al., 1992; Nees and Struck, 1994; Struck, 1997 и др.).

В дополнение к анализу БФ в **разделе 3.4** описаны методики седиментологического (описание литологического состава, определение цветовых характеристик, проведение гранулометрического анализа, подсчет IRD), геохимического ($CaCO_3$, C_{org}), изотопного ($\delta^{13}C$) и микропалеонтологического (ПФ) анализов изученных колонок, любезно предоставленные коллегами ИО РАН и частично выполненные автором.

Раздел 3.5 содержит методику статистического анализа первичных количественных данных БФ по колонкам. Она включает методы кластеризации (стратиграфическая и групповая), главных компонент (PCA) и неметрического многомерного масштабирования (nMDS). Обработка первичных данных по БФ в колонках проводилась в программе PAST (Paleontological Statistics Software for Education and Data Analysis). Автором работы рассмотрены 12 вариантов обработки полученной базы данных по БФ и представлены 4 алгоритма проведения стратиграфического кластерного анализа для расчленения и прогнозирования интервалов в колонках донных осадков.

Глава 4. Результаты изучения осадков из колонок

В главе описаны разрезы и представлены результаты седиментологического, изотопно-геохимического, микропалеонтологического и статистического анализов десяти колонок осадков (ТБД и МК) на семи станциях.

Раздел 4.1 представляет детальное описание основных результатов исследования колонок. На основе радиоуглеродного датирования и климатостратиграфического подхода в исследуемых колонках выделены следующие интервалы четвертичного времени: 1) середина среднего плейстоцена-голоцен - АМК-5188 ТБД (ЮЗ часть Лофотенской котловины; мощность 417 см; возраст основания ~280 тыс. лет; МИС 8-1), АМК 5536 ТБД (СВ склон хр. Мона; мощность 450

см; возраст основания ~273.8 тыс. лет; МИС 8-1), АМК-5890 ТБД (ЮЗ континентальный склон о. Исландии, Датский пролив; мощность 424 см; МИС 7-1); 2) середина позднего плейстоцена-голоцен - АМК-5524 ТБД (СВ континентальный склон Лофотенской котловины-Баренцево море; мощность 350 см; возраст основания ~36 тыс. лет); 3) конец позднего плейстоцена-голоцен - АМК 5536 ДЧ (мощность 15 см; МИС 1), АМК-5524 МК (мощность 29 см; МИС 1), АМК-5656 ТБД (западный шельф Великобритании, бассейн Уэстрей; мощность 625 см; МИС 1), АМК-5656 МК (мощность 18 см; МИС 1); 4) середина среднего голоцена-поздний голоцен - АМК-6142 МК (ЮЗ часть Лофотенской котловины; мощность 27 см; возраст основания ~6.6 тыс. лет; МИС 1), АМК-6150 МК (восточный склон хр. Книповича; мощность 31 см; возраст основания ~2.8 тыс. лет; МИС 1).

Колонка АМК-5188 ТБД выступает в качестве эталона в работе в связи с детальным опробованием (с шагом 1–2 см) разреза, наибольшим количеством результатов комплексного анализа, а также достоверной возрастной моделью (рис. 2). Остальные колонки из НГБ и ССА детализируют палеоокеанологическую информацию об обстановках и условиях окружающей среды за последние 280 тыс. лет.

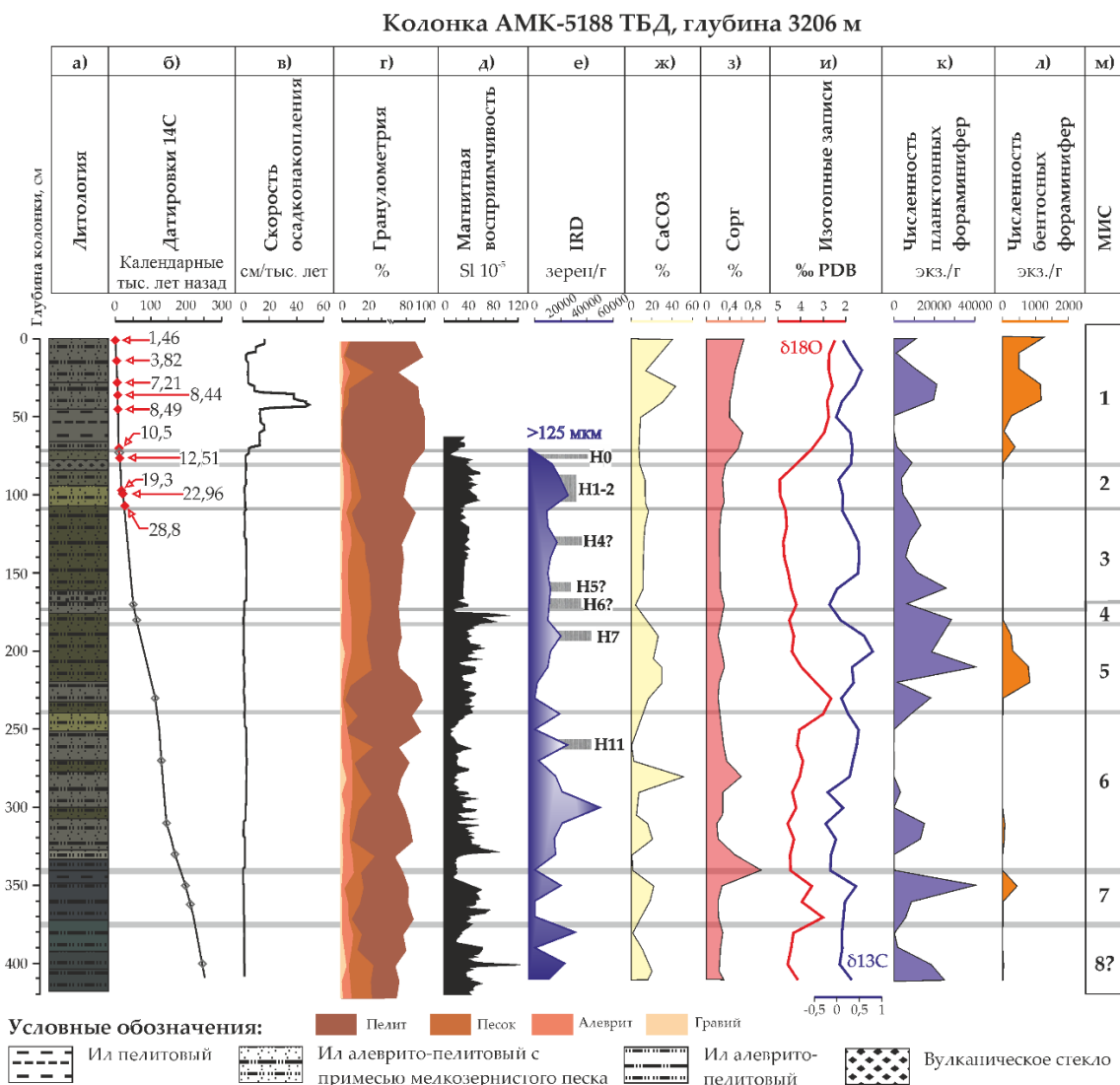


Рисунок 2. – Колонка АМК-5188 ТБД и характеристики ее разреза. МИС – морские изотопные стадии. Н – события Хайнриха.

В разделе представлены данные микропалеонтологического анализа БФ и ПФ: определение видового состава, подсчет абсолютной концентрации и процентного соотношения таксонов. Графики численности и состава БФ и ПФ показывают изменения палеосреды в выделенных интервалах оледенений и межледниковий, тысячелетних событий похолодания, потеплений и эпох голоцена (рис 3-4).

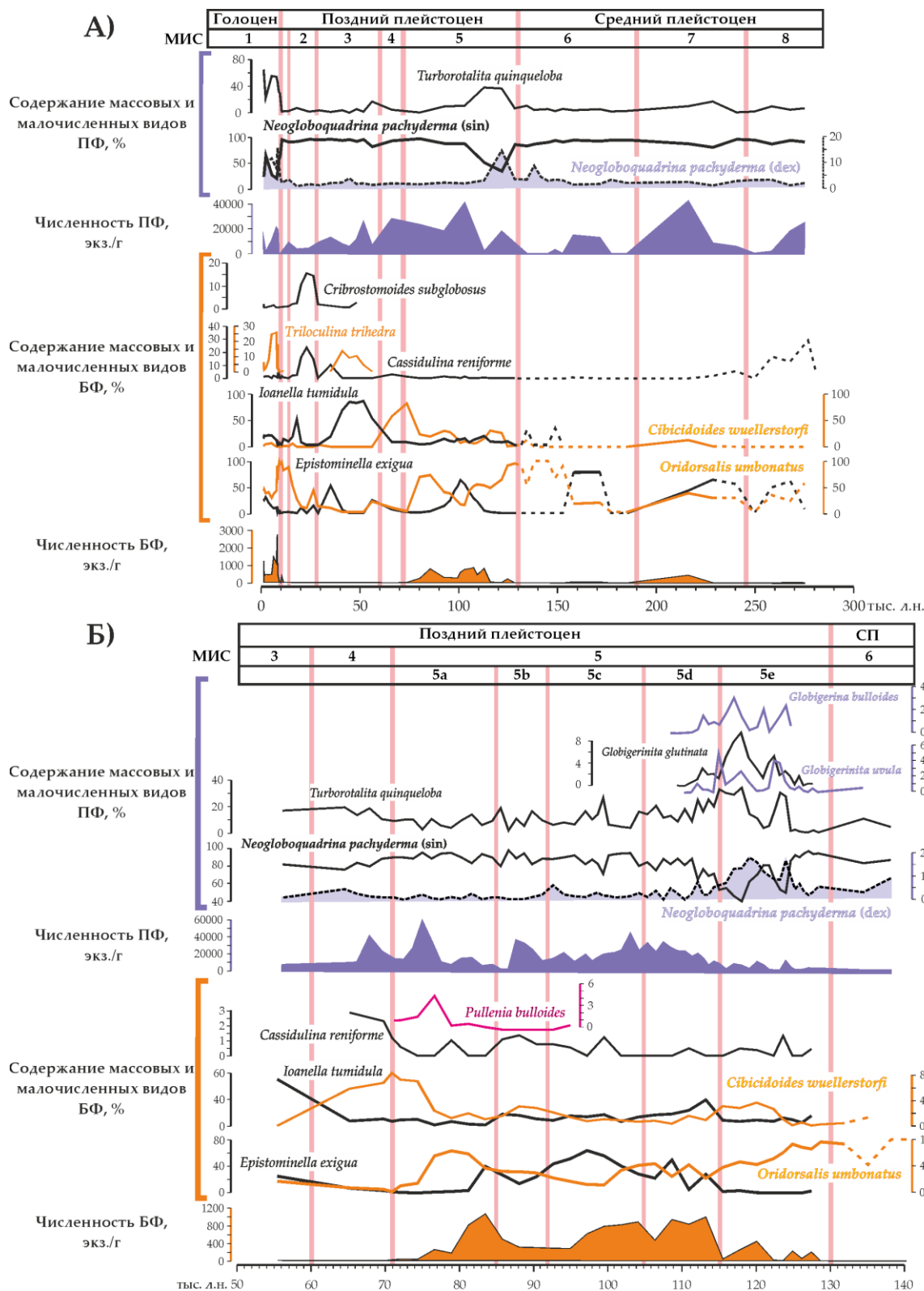


Рисунок 3. – Фораминиферы в колонке АМК-5188 ТБД в интервалах: А) МИС 8-1; Б) МИС 6-3.

МИС – морские изотопные стадии. СП – средний плейстоцен.

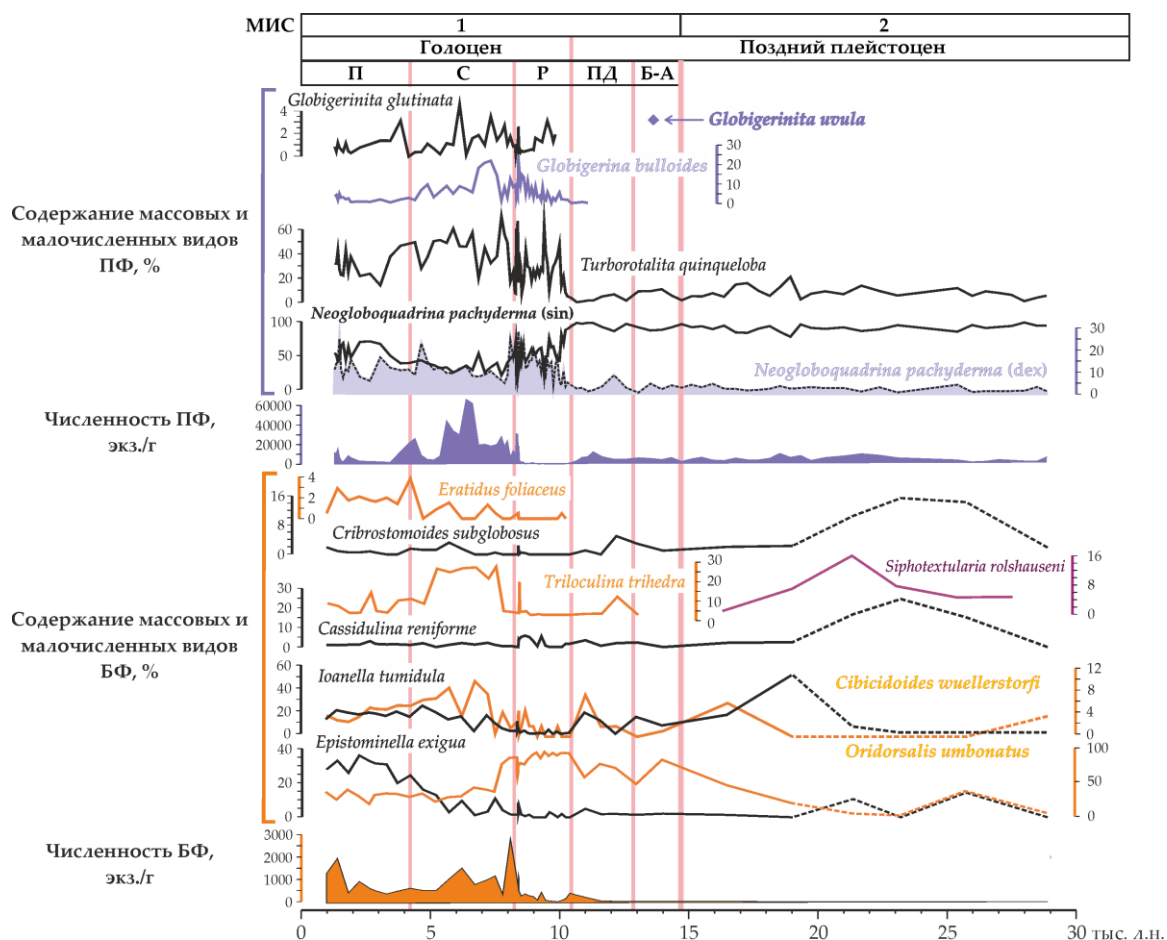


Рисунок 4. – Фораминиферы в интервале МИС 2-1 колонки АМК-5188 ТБД. МИС – морские изотопные стадии. Позднечетвертичные события: ПД – поздний дриас, Б-А – бёллинг-аллерёд, и эпохи голоцена: Р – ранний, С – средний, П – поздний.

В результате в исследуемых колонках зафиксировано следующее:

Наибольшее скопление раковин регионального стратиграфически важного вида *S. rolshauseni* стадии МИС 2 отмечается в интервале 21–20 тыс. л.н, что позволяет более четко маркировать уровень максимума последнего оледенения в разрезах отложений. Удалось выяснить ограниченное географическое распространение вида *S. rolshauseni* в МИС 2 только в осадках Норвежского и Исландского морей на основе анализа собственных данных и предыдущих исследований (по Struck, 1995; Nees and Struck, 1994; Struck, 1997). Также, полученные результаты позволили расширить ареал встречаемости этого вида в позднечетвертичных отложениях на север Лофотенской котловины.

Данные из НГБ указывают на отсутствие вида *P. bulloides* в интервале межледниковой МИС 5e. Они фиксируют его появление лишь в интервале МИС 5c, и наибольшую концентрацию этого вида в подстадиях МИС 5c и 5a. Это не согласуется с ранее проведенными исследованиями (Naake and Pflaumann, 1989; Fronval and Jansen, 1997; Struck, 1997; Lukashina and Bashirova, 2015) и ограничивает использование *P. bulloides* для стратиграфии МИС 5 в НГБ и ССА.

В отложениях колонки АМК-5890 ТБД (Датский пролив) определен вид *Pullenia osloensis* Feyling-Hanssen, 1954, данные об экологических предпочтениях которого ограничены. Он впервые появляется, предположительно, в МИС 5 и достигает в этом интервале наибольшего

содержания, становясь доминирующим видом. Экология вида *P. osloensis*, вероятно, связана с условиями обитания *P. bulloides*, судя по их нахождению в одном интервале и схожими вариациями содержания. Таким образом, этот таксон можно использовать в качестве индикаторного вида в мелководных районах, свидетельствующего о высоком потоке ОВ и сильном влиянии арктических течений.

В отложениях Норвежского моря отмечается ограниченная временная встречаемость и распространение агглютинирующих видов *Adercotryma glomerata* (Brady, 1878), *Cystamina pauciloculata* (Brady, 1879), *Haplophragmoides* sp. Cushman, 1910, *Recurvoides contortus* Earland, 1934 и *Tritaxis conica* (Parker & Jones, 1865). Все они впервые появляются с наступлением голоценовых условий, а наибольшее распространение вида *A. glomerata* отмечается с начала среднего голоцена.

В разделе 4.2 рассмотрен ряд палеоокеанологических и палеоэкологических аспектов работы, описанных с помощью сравнения индикаторов комплексного исследования.

Сравнительный анализ литолого-геохимических (IRD, CaCO₃, C_{орг}), изотопных ($\delta^{13}\text{C}$) и микропалеонтологических (численность ПФ и БФ) данных в колонках АМК-5188 ТБД и АМК-5536 ТБД показал, что, возможно, существовали два фактора, которые могли препятствовать развитию фораминифер и/или способствовали их растворению на дне: стратификация поверхностных вод за счет сброса талых вод в результате отступления ледников и связанное с этим ослабление вертикального перемешивания, что приводило к низкому содержанию кислорода на дне.

Анализ распределения основных доминирующих видов поверхностной инфауны *E. exigua* и *O. umbonatus* в длинных и коротких колонках НГБ (рис. 5, А) показал, что их совместное присутствие связано с потеплениями и, скорее всего, высоким потоком ОВ на дно.

Но при сравнении содержания этих видов с вариациями $\delta^{13}\text{C}$ и концентрацией планктонных видов *Neogloboquadrina pachyderma* (Ehrenberg, 1861) *sinistral* (или *sin.* – левозавитая)-*Turborotalita quinqueloba* (Natland, 1938) установлено, что соотношение видов в сообществе *E. exigua*-*O. umbonatus* связано с величиной первичной продукции, периодичностью поступления ОВ и миграцией Арктического фронта в районе НГБ (рис. 5, А). Усиление притока атлантических вод, вероятно, приводило к увеличению биопродуктивности поверхностных вод и установлению постоянного потока ОВ на дно, а в осадках преобладающим видом являлся *O. umbonatus*. При сильном влиянии Арктического фронта поверхностная продуктивность была интенсивной, а поступление ОВ на дно имело, по-видимому, сезонный характер. В таких условиях вид *O. umbonatus* из-за неподходящего режима поступления ОВ переставал развиваться и конкурировать за ограниченные ресурсы, а таксон *E. exigua* занял освободившуюся экологическую нишу, став доминирующим видом в сообществе.

Исследование распределения доминирующих видов эпифауны *I. tumidula* и *C. wuellerstorfi* в колонках показало, что они обитают вместе в периоды межстадиалов, отражая условия свободные ото льда, что, возможно, способствует усилению придонной циркуляции. Однако в МИС 2–3 (рис. 5, Б), где ранее фиксировали поступление глубинных водных масс с низким

содержанием кислорода (Schnitker, 1982; Skinner and Shackleton, 2004; Лукашина, 2008), вид *C. wuellerstorfi* отсутствует, а высокая концентрация *I. tumidula* свидетельствует о его приспособленности к переменному содержанию кислорода на дне.

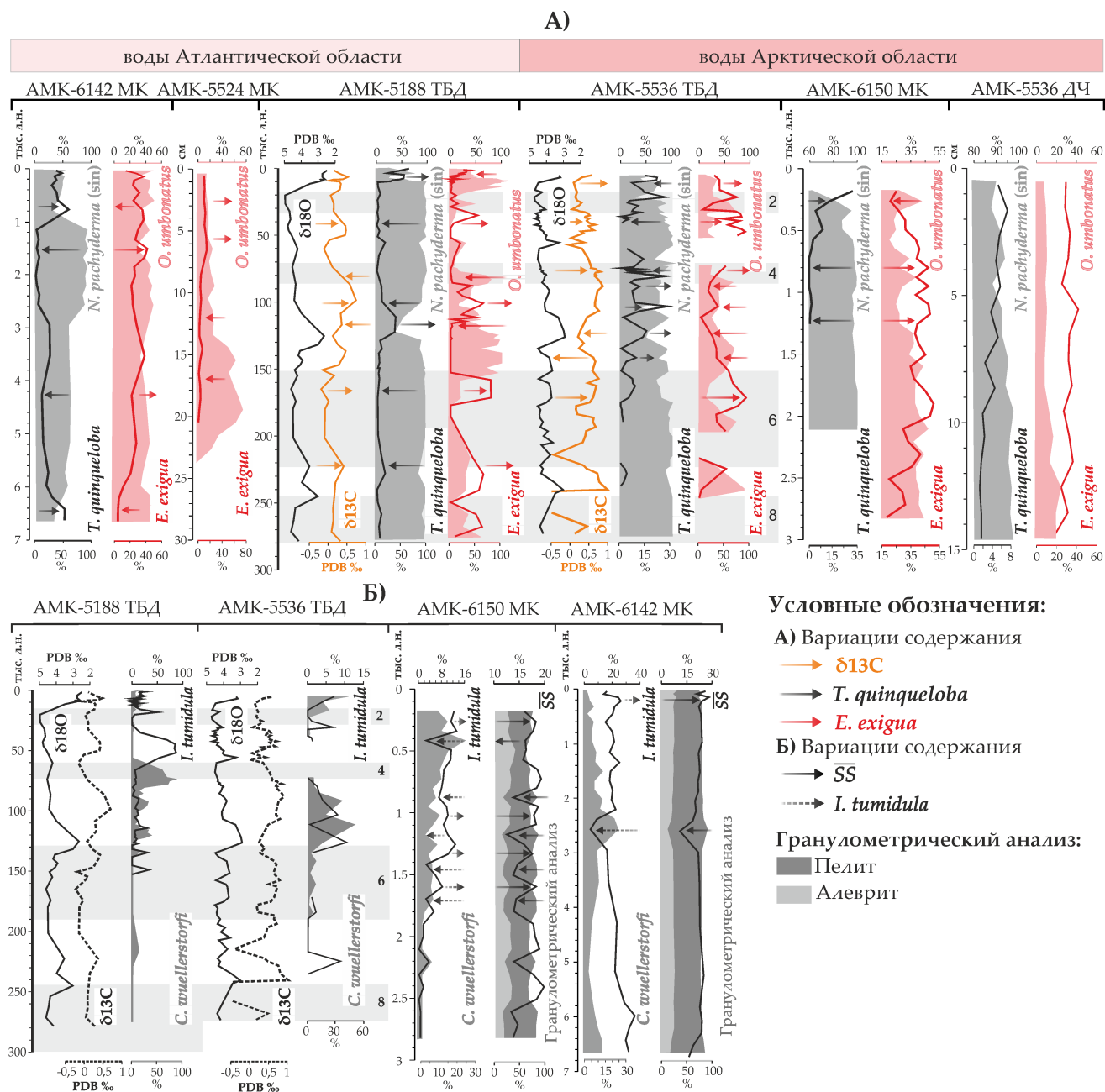


Рисунок 5. – Сравнительный анализ в длинных и коротких колонках: А) изотопных записей и содержания планктонных *N. pachyderma* (sin.)-*T. quinqueloba* и бентосных *E. exigua*-*O. umbonatus* фораминифер; Б) седиментологических данных и концентрации видов *C. wuellerstorfi* и *I. tumidula*. \overline{SS} – средний размер минеральных частиц во фракции 10–63 мкм или “sortable silt”. Серым цветом и цифрами отмечены ледниковые стадии.

Сравнение концентрации видов эпифауны с гранулометрическим анализом и показателем интенсивности палеотечений “sortable silt” (\overline{SS}) показало, что конкуренция между ними зависит от условий осадконакопления (рис. 5, Б). Вид *I. tumidula* предпочитает более спокойные обстановки, в то время как *C. wuellerstorfi* обитает в активной гидродинамической придонной

среде. Также флуктуации концентрации вида *I. tumidula*, которые схожи с колебаниями содержания \overline{SS} , могут служить индикатором более кратковременных и плавных изменений относительной скорости движения придонных течений, несмотря на его предпочтение к более спокойным условиям осадконакопления.

Раздел 4.3 посвящен результатам статистической обработки данных, которые рассмотрены на четырех показательных примерах:

1) Датированная длинная колонка с успешным проведением статистического подхода (АМК-5188 ТБД). Анализ стратиграфической кластеризации демонстрирует, что варианты 1d и 2d оказались наиболее подходящими для разделения композиционных кластеров в соответствии с климатостратиграфическими интервалами и хронозонами МИС. Групповая кластеризация, PCA и nMDS подтвердила объединение групп интервалов и скопления видов, в зависимости от климатических условий, придонных обстановок и наличия ОВ. С точки зрения микропалеонтологического анализа выявлено, что вариант 2d дал более точные результаты в построении композиционных зон и определении таксономических групп.

2) Аналогичная колонка, в которой подход не принес ожидаемых результатов (АМК-5536 ТБД). Скорее всего, это связано с недостаточным объемом данных (пробоотбор с шагом 10 см), однородностью распределения комплексов БФ, а также факторами седиментации, которые затруднили применение стратиграфической кластеризации. В результате ни один из вариантов не дал удовлетворительного случая объединения композиционных зон по климатостратиграфическим зонам МИС. Групповая кластеризация, PCA и nMDS указывают, что в изученном районе не происходило резких смен условий в придонном слое. Сообщества развиваются параллельно друг другу, и в периоды появления ОВ происходит стабилизация их численности.

3) Датированная короткая колонка, отражающая тысячелетние изменения палеоусловий (АМК-6142 МК). По данным стратиграфической кластеризации зафиксирована однородность композиционной зоны, которая демонстрирует принадлежность к единому хронологическому горизонту (голоцену). Только варианты 3d и 3d (Jaccard) установили эпоху неогляциации и разделение подзон между средне- и позднеголоценовыми отложениями (уровень 4.2 тыс. лет). Анализ групповой кластеризации, методов PCA и nMDS в вариант 2d позволил определить наиболее конструктивное распределение БФ для выявления палеоэкологических факторов.

4) Недатированная короткая колонка (АМК-5524 МК). Стратиграфическая кластеризация показала, что во всех вариантах определяется четкая предположительная граница 20 см между ледниковыми условиями плейстоцена (вероятно, окончание эпохи позднего дриаса) и потеплением в голоцене. Аналогично интерпретации в колонке АМК-6142 МК, в вариантах 3d и 3d (Jaccard) фиксируют формирование подзон по ориентировочно выставленным границам эпох голоценового времени, а для анализа условий по сообществам БФ групповой кластеризации, PCA и nMDS выбран вариант 2d.

Для остальных колонок проведены аналогичные анализы и даны только короткие

содержательные выводы. В разделе 4.4 представлены выводы по Главе 4.

Глава 5. Реконструкция средне-позднечетвертичной истории палеообстановок НГБ и ССА за последние 280 тыс. лет

Реконструкции палеоокеанологических условий основаны на результатах комплексного анализа исследуемых колонок и их корреляции с данными предыдущих исследований. Такой подход позволяет дополнить имеющиеся сведения о палеообстановках в НГБ и ССА за последние 280 тыс. лет.

Раздел 5.1 описаны палеоокеанологические обстановки МИС 8 (280–245 тыс. л.н.), которая зафиксирована в отложениях колонок АМК-5188 ТБД и АМК-5536 ТБД в ЮЗ части Лофотенской котловины и СВ склоне хр. Мона (НГБ). Раковины БФ отсутствуют или редки в осадках, отражая дефицит поступления ОВ и «застойные» условия на дне. Пиковые значения IRD указывают на широкую область распространения морского льда и айсбергов в бассейне. Однако относительно высокая численность ПФ свидетельствует о кратковременных вспышках продуктивности поверхностных вод у кромки сезонных льдов.

В конце МИС 8 (терминация III, 260–245 тыс. л.н.), сообщество фораминифер резко исчезло, предположительно, в связи с растворением и низким содержанием кислорода в придонном слое. Синхронное изменение значений индикаторов (IRD, $\delta^{13}\text{C}$, CaCO_3 , $\text{C}_{\text{орг}}$) свидетельствует об активном таянии ледников, сбросе талых вод и резко выраженной приповерхностной стратификации.

Ограниченные палеоокеанологические реконструкции в интервалах МИС 8 и терминации III связаны с фокусом предыдущих исследований на более актуальные интервалы в колонках НГБ. Тем не менее ранние работы (Hevrøy et al., 1996; Struck, 1997; Kandiano and Bauch, 2002; Helmke and Bauch, 2003) демонстрируют аналогичные графические интерпретации результатов изотопного, седиментологического и микропалеонтологического анализа, что соответственно, позволяет дополнить новые аспекты палеообстановок для МИС 8.

Межледниковье МИС 7 (245–190 тыс. л.н.), описанное в разделе 5.2, характеризуется высокоамплитудными колебаниями условий в исследуемых колонках. В первом случае, в интервалах 245–230, 220–205 и 200–190 тыс. л.н. небольшой синхронный рост общей численности фораминифер, совпадающий с минимумами значений IRD, появление сообществ *O. umbonatus*-*E. exigua*, *C. wuellerstorfi*-*I. tumidula* и субполярного вида *T. quinqueloba* указывают на возникновение высокой продуктивности поверхностных вод и интенсивного потока ОВ в связи с фазами притока теплых атлантических водных масс во время сезонно свободных ото льда условий в НГБ. Во втором случае, в интервалах ~230–200 и 205–190 тыс. л.н. раковины ПФ и БФ резко исчезают, а рост содержания IRD, отрицательные значения $\delta^{13}\text{C}$ и обратная зависимость CaCO_3 - $\text{C}_{\text{орг}}$ свидетельствуют об условиях, схожих с таковыми при дегляциации.

Вероятно, в первом случае палеоокеанологические индикаторы указывают на интерстадиальные эпизоды потепления в МИС 7e, 7c, 7a, что подтверждается результатами предыдущих исследований по резким флуктуациям численности микроорганизмов (Struck, 1997; Renaud et al., 2008). Во втором случае фиксируются, предположительно, стадиальные интервалы

МИС 7d и МИС 7b, в которых низкокислородные и агрессивные по отношению к карбонатным микрофоссилиям условия были обусловлены разгрузкой морского льда и, как следствие, сбросом талой воды. Эти события носят диахронный характер в записях колонок из Норвежского моря (Helmke and Bauch, 2003; Choudhury, 2020), которые также могли быть вызваны проникновением в котловины агрессивных глубинных водных масс (Broecker and Clark, 2001; Broecker and Clark, 2002).

В колонке АМК-5890 ТБД из Датского пролива, предположительно, в отложениях МИС 7 отсутствуют раковины БФ. Высокий поток IRD свидетельствует о распространении ледового покрова, который ограничивал формирование первичной продукции и обмен через пролив поверхностных вод между Северной Атлантикой и Арктикой. А установленный ранее нерегулярный и слабый приток теплых атлантических течений в глубоководную часть НГБ осуществлялся, предположительно, через Фарерско-Шетландский или Фарерско-Исландского пороги. Ранее в данном районе МИС 7 не была вскрыта колонками, но ледниково-морские палеобстановки фиксировались в западной и СЗ части НГБ (Hevrøy et al., 1996; Stein et al., 1996; Alley et al., 2010).

В разделе 5.3 приведены реконструкции, которые отражают палеоокеанологические условия в разных частях НГБ в МИС 6 (190–130 тыс. л.н.).

В Датском проливе редкие раковины БФ и высокие значения IRD свидетельствуют о сохранении низкопродуктивных условий и ледового покрова на поверхности бассейна, предположительно, до конца МИС 6. В ЮЗ части Лофотенской котловины также зафиксированы пики IRD и отсутствие БФ и ПФ, а обратная зависимость содержания $\text{CaCO}_3\text{-C}_{\text{орг}}$ в начале МИС 6 свидетельствует о растворении и низком содержании кислорода на дне. Авторы предыдущих исследований отмечают, что эти обстановки типичны для НГБ (Fronval and Jansen, 1997; Hebbeln and Wefer 1997; Struck, 1997; Bauch et al., 1999). Однако внутри МИС 6 зафиксирован горизонт (~165–150 тыс. л.н.) невысокого синхронного роста численности ПФ и БФ, что, вероятно, отражает кратковременное значительное потепление и усиление притока высокопродуктивной североатлантической воды.

В отложениях на хр. Мона фиксируется относительно высокая численность БФ, где доминирует высокопродуктивное сообщество *E. exigua*-*O. umbonatus*, а постоянно присутствующая небольшая концентрация индикаторного вида эпифауны *C. wuellerstorfi* отражает свободные ото льда обстановки, гидродинамически активные придонные условия и приток глубинной воды, насыщенной кислородом. Также МИС 6 характеризуется минимумом содержания IRD, увеличением концентрации субполярного вида *T. quinqueloba* и распространением тепловодных таксонов *Globigerina bulloides* d'Orbigny и *Globigerinita glutinata* (Egger, 1893), которые подтверждают реконструированные условия по БФ, а также дополняют сведения о довольно сильном и постоянном влиянии атлантических течений. Они проникали в НГБ, вероятно, через Фарерско-Шетландский или Фарерско-Исландский проливы.

Ранее о кратковременных этапах притока атлантических водных масс в МИС 6 сообщалось в работах по колонкам вблизи о. Ян-Майен (Bauch, 1997; Struck, 1997; Bauch and Helmke, 1999),

Фарерских островов (Rasmussen et al., 1999) и пролива Фрама (Hebbeln and Wefer 1997; Былинская и Головина, 2012). Однако существование продолжительного сезона свободных ото льда условий, когда сохранявшийся приток атлантических течений создавал высокую поверхностную продуктивность и интенсивный поток ОВ на дно, ранее не зафиксировано и является новым в реконструкции условий в НГБ.

Конец МИС 6 характеризуется наступлением терминации II (~160-128 тыс. л.н.), условия которой достаточно хорошо реконструированы и результаты соответствуют ранее опубликованным (Bauch and Helmke, 1999; Bauch et al., 1999; Bauch and Erlenkeuser, 2008).

Раздел 5.4 посвящен палеоокеанологическим реконструкциям в интервале МИС 5. В начале межледниковья МИС 5e (130–115 тыс. л.н.) фиксируется резкая смена режима осадконакопления: падает до минимума содержание IRD, растет общая численность фораминифер, увеличивается концентрация сообщества *O. umbonatus*-*E. exigua*, вида *S. wuellerstorfi*, становятся доминирующими субполярные и тепловодные виды *T. quinqueloba* (до 40 %), *N. pachyderma* (dex.), *G. bulloides*, *Globigerinita uvula* (Ehrenberg, 1861) и *G. glutinata*. Все эти индикаторы отражают высокопродуктивные, свободные ото льда условия, усиление притока тепловодных течений и сдвиг Арктического и Полярного фронтов на запад, а также высокий поток ОВ на дно и активную глубинную конвекцию.

С одной стороны, МИС 5e называют климатическим оптимумом последнего межледниковья и полученные результаты подтверждаются предыдущими исследованиями (Fronval and Jansen, 1997; Knudsen et al., 2002; Hoff et al., 2019). С другой стороны, некоторые авторы установили менее выраженное потепление, где продолжались холодноводные ледниковые условия, а приток арктической и атлантической водных масс были слабыми (Rasmussen et al., 2007; Погодина, 2010; Былинская и Головина, 2012).

Записи в колонке Датского пролива не подтверждают последнее предположение для ЮЗ части НГБ у Исландии и Гренландии. В начале МИС 5 резкий рост общей численности, разнообразия и доминирующих «арктической» группы видов БФ (*Cassidulina reniforme* (Nørvang, 1945), *Elphidium clavatum* Cushman, 1930, *Nonion labradoricum* (Dawson, 1860), *Astrononion gallowayi* Loeblich & Tappan, 1953 *Islandiella norcrossi* (Cushman, 1933)) указывают на усиление влияния в проливе полярных/арктических вод Восточно-Гренландского течения. При этом появление и распространение видов «атлантической» группы (*Cassidulina obtusa* Williamson, 1858, *Trifarina angulosa* (Williamson, 1858), *Cassidulina carinata* Silvestri, 1896, и *Cassidulina laevigata* d'Orbigny, 1826, *Uvigerina peregrina* Cushman, 1923) свидетельствуют о свободной ото льда обстановке, которая дала возможность проникновению теплого течения Ирмингера на север. Ранее Н.П. Лукашина (2018) предполагала, что теплая поверхностная североатлантическая вода поступала в НГБ в МИС 5, в основном, через Исландско-Гренландский порог, а не Фарерско-Исландский, как в голоцене. Однако ее колонки располагались южнее района Датского пролива в центре Исландского бассейна. Таким образом, на основе микропалеонтологических данных БФ впервые установлено проникновение атлантических течений в НГБ, где ранее о притоках в МИС 5 судили по распределению видов ПФ, соответственно.

Во время похолодания МИС 5d-a (115–71 тыс. л.н.) в колонках НГБ возрастающая численность, и состав фауны БФ, доминирование вида *E. exigua* в сообществе и сопутствующее увеличение значений $\delta^{13}\text{C}$, свидетельствуют о продолжающейся высокой или очень высокой, но сезонной, поверхностной биологической продуктивности, возникающей у Арктического фронта и кромки льда. В это время асинхронное развитие видов *C. wuellerstorfi* и *I. tumidula*, вероятно, отражает изменение скорости и интенсивности придонных течений. Как полученные данные, так и предыдущие результаты в колонках НГБ фиксируют уменьшение содержания субполярного сообщества ПФ, а также отсутствие тепловодных видов ПФ (Fronval and Jansen, 1997; Knudsen et al., 2002; Bauch and Erlenkeuser, 2008), связанных с ослаблением атлантических течений.

В Датском проливе в середине МИС 5 доминирующим становится вид эпифауны *Cibicides lobatulus* (Walker & Jacob, 1798). Его максимальное содержание отражает усиление интенсивности глубинных/придонных течений и увеличение концентрации кислорода на дне. В конце МИС 5 исчезновение малочисленного «атлантического» сообщества БФ и уменьшение содержания видов эпифауны в конце МИС 5 указывает на расширение Арктической/Полярной фронтальной зоны к Исландии и проявление «стрессовых» низкопродуктивных условий вблизи дна. При этом сохранение небольшой концентрации бореального вида *C. obtusa* может свидетельствовать о сохранившемся влиянии теплого соленого течения Ирмингера во время сезонно свободных ото льда условий в проливе, что согласуется с более ранними реконструкциями в Гренландском и Исландском морях (Kellogg, 1980; Fronval and Jansen, 1997).

Раздел 5.5. МИС 4 в НГБ характеризовался резким уменьшением численности БФ, исчезновением субполярного вида ПФ и увеличением концентрации IRD, которые отражают ледниковые и низкопродуктивные условия. Однако раковины видов *O. umbonatus* и *C. wuellerstorfi* указывают на сохранение богатой кислородом воды на дне, поступающей с глубинными и придонными течениями. В данных исследования и результатах предыдущих работ МИС 4 представляет собой маломощный интервал, обедненный раковинами БФ и ПФ, по которому трудно установить обстановки осадконакопления (Bauch, 1997; Struck, 1997; Rasmussen et al., 2003; Berger et al., 2016).

В интервале ~60–50 тыс. л.н. (МИС 3) зафиксировано резкое исчезновение раковин ПФ и БФ, увеличение концентрации IRD и $\text{C}_{\text{орг}}$, а также минимумы значений CaCO_3 и $\delta^{13}\text{C}$. В это время реконструировано событие опреснения, которое обусловило сильную стратификацию поверхностных вод, низкое содержание кислорода и растворение известковых раковин на дне. Значительное опреснение поверхностных вод вначале МИС 3 подтверждается данными изотопно-углеродных записей (Bauch and Helmke, 1999; Rasmussen et al., 2014; Hoff et al., 2016) и геохимического анализа $\text{C}_{\text{орг}}\text{-CaCO}_3$ (Helmke and Bauch, 2003).

Отложения в НГБ после уровня 50 тыс. лет характеризуются возрастанием численности БФ и ПФ, вероятно, в связи с исчезновением опреснённого слоя и сезонным поступлением ОВ, которое фиксируют преобладающие виды *E. exigua* и *C. reniforme*. Судя по исчезновению вида *C. wuellerstorfi* у дна существовали мало насыщенные кислородом воды, а распространение вида *I. tumidula* свидетельствует о продолжающемся действии слабоинтенсивных (вероятно,

ламинарных) придонных течений. Доминирование полярного вида *N. pachyderma* (sin.) и пики IRD, как признак событий Хайнриха H5-4, характеризуют условия относительно холодного поверхностного водного слоя и фазы поступления и перемещения многочисленных льдов в НГБ, которые согласуются с предыдущими исследованиями (Былинская и Головина, 2012; Bauch et al., 2012; Rasmussen et al., 2014; Талденкова и др., 2016).

В Датском проливе в МИС 4–3 численность и состав БФ подобны таковым в конце МИС 5 и указывают на сохранение ослабленного потока атлантического течения и обстановок в бассейне. Увеличение содержания IRD свидетельствует о поступлении льдов. Однако высокое разнообразие и доминирование *C. reniforme* в сопровождении с *N. labradorica* и *I. norcrossi* указывают на высокую сезонную биопродуктивность, которая характерна для поверхностного слоя у кромки плавающих льдов. В МИС 3 доминирующий вид *Fursenkoina fusiformis* (Williamson, 1858) отражает высокий поток ОВ и низкокислородные условия, которые можно сопоставить с событием опреснения в НГБ. Сезонно свободные и высокопродуктивные условия поверхностных вод ранее зафиксированы в проливе Фрама (Hevrøy et al., 1996; Hebbeln and Wefer 1997), Гренландского моря (Streeter et al., 1982), и шельфа Исландии (Eiriksson et al., 2000; Hagen and Hald, 2002).

Раздел 5.6 описывает заключительный этап последнего оледенения МИС 2 (29–14.7 тыс. л.н.).

В НГБ в СВ и ЮЗ частях Лофотенской котловины отложения МИС 2 характеризуются самыми низкими значениями численности ПФ и БФ. При этом встреченные раковины вида-индикатора *Cassidulina teretis* Tarran, 1951 на СВ окраине Лофотенского бассейна (колонка АМК-5524 ТБД) свидетельствуют о вероятной адвекции атлантических вод на север в интервале 29–26 тыс. л.н. Но постоянно высокое содержание IRD в этих колонках указывает на сильное влияние морских льдов и айсбергов на осадконакопление в районе. Данные палеоокеанологические обстановки характерны для норвежского шельфа, пролива Фрама и СЗ части Гренландского моря (Stein et al., 1996; Hebbeln and Wefer 1997; Andrews, 2008; Risebrobakken et al., 2011), а этапы проникновения теплых течений в северную часть НГБ, которые фиксируют по появлению раковин вида *C. teretis*, установлены в колонках из Фарерско-Исландского порога (Rasmussen and Thomsen, 2017), центральной части НГБ (Dokken and Jansen, 1999), западной части о. Шпицберген (Slubowska-Woldengen et al., 2008) и проливе Фрама (Былинская и Головина, 2012).

На хр. Мона одновозрастные осадки характеризуются минимумом содержания IRD, пиком численности ПФ и БФ, сообществом *E. exigua*-*O. umbonatus* и появлением вида индикатора *C. wuellerstorfi*. Данный комплекс БФ указывает на поступление высокого сезонного потока ОВ и глубинной воды с высоким содержанием кислорода, а также возобновление активной гидродинамической обстановки. В ассоциации ПФ концентрация вида *N. pachyderma* (sin.) резко падает, и эту нишу занимают субполярные и тепловодные таксоны. Их обилие свидетельствует о нормально-морских и сезонно свободных ото льда условиях, а также довольно сильном влиянии теплых атлантических вод в СВ часть НГБ. Глубоководные осадки из Норвежского, Исландского морей и Исландского бассейна содержат довольно большую концентрацию карбонатного

материала, представленного раковинами БФ и субполярных ПФ (Struck, 1995; Helmke and Bauch 2003; Lukashina and Bashirova, 2015), что согласуется с полученными результатами.

В Датском проливе сообщество БФ сохраняется, но с началом МИС 2 в видовом составе БФ возобновляется доминирование вида эпифауны *C. lobatulus*, что означает возвращение насыщенных кислородом глубинных водных масс и активной гидродинамической обстановки в придонном слое. Его концентрация сохраняется до верха разреза и, таким образом, можно предположить установление придонной циркуляции современного типа в ЮЗ части НГБ у западной Исландии уже в МИС 2.

МИС 1, описанная в **разделе 5.7**, включает тысячелетние события бёллинг-аллерёд, поздний дриас и голоцен.

Тысячелетние события потепления бёллинг-аллерёд (Б-А; 14.7–12.9 тыс. л.н.; **раздел 5.7.1**) и похолодания позднего дриаса (ПД; 12.9–11.7 тыс. л.н.; **раздел 5.7.2**) в исследуемых колонках отмечается малочисленными раковинами ПФ и БФ. Но в Б-А минимум содержания IRD, и появление в глубоководном сообществе видов *C. teretis*, *I. tumidula* и *G. uvula* и в мелководной ассоциации видов «атлантической» группы БФ свидетельствует о тепловодных, высокопродуктивных и свободных ото льда условиях, а также усилении притока теплых водных масс в проливах. В колонке АМК-5656 ТБД с шельфа Великобритании в отложениях предположительно ПД зафиксирована высокая численность БФ и содержание видов эпифауны (*Rosalina vilardeboana* d'Orbigny, 1839-*C. lobatulus*), которые указывают на высокое содержание кислорода, высокий поток ОБ и активные гидродинамические обстановки на дне в Фарерско-Шетландском пороге. Полученные результаты дополняют предыдущие исследования (Nees et al., 1997; Pflaumann et al., 2003; Slubowska-Woldengen et al., 2008; Thiagarajan et al., 2014) и подтверждает синхронное изменение условий во время тысячелетних событий в районе НГБ и ССА.

В раннем голоцене (от 11.7–11.3 до 8.2 тыс. л.н.; **раздел 5.7.3**) во всех изученных колонках отмечается отсутствие IRD и рост общей численности фораминифер. В комплексе ПФ фиксируется смена с полярного на субполярные и тепловодные виды. В сообществе БФ изменяется состав с олиготрофных на высокопродуктивные глубоководные виды, а в мелководной ассоциации – с «арктической» на «атлантическую» группу. Все эти индикаторы указывают на тепловодные обстановки, сильную адвекцию атлантических вод с восточной и западной стороны НГБ, отступление ледников и к востоку Полярного/Арктического фронта. Это согласуется с палеоокеанологическими выводами по исследованным голоценовым отложениям в высоких широтах (Bauch et al., 2001b; Knudsen et al., 2004; Slubowska-Woldengen et al., 2008; Telesiński et al., 2015)

В интервалах оптимума, похолодания и неогляциации в средне- (8.2–4.2 тыс. л.н.) позднеголоценовое (4.2–0 тыс. л.н.) время общая численность и видовое разнообразие фораминифер сначала достигает максимума, а затем быстро уменьшается. Ранее данные события в бассейне НГБ регистрировали по аномалиям температуры поверхности водной толщи в НГБ (Bauch et al., 2001b; Sarnthein et al., 2003; Jansen et al., 2009), рассчитанных с помощью

современного аналогового метода максимального сходства (SIMMAX), и появлению глубоких экстремумов изотопно-кислородных записей (Rasmussen et al., 2007; Werner et al., 2013; Telesiński et al., 2015).

Следует отметить, что в интервале от 2.9 до 1.1 тыс. л.н., если в ЮЗ части Лофотенской котловины (колонка АМК-6142 МК) сообщество БФ, в целом, сохранялось, то на хр. Книповича (колонка АМК-6150 МК) превалирующее содержание агглютинирующих фораминифер свидетельствует об обстановках растворения, низкого содержания кислорода и насыщенных ОВ поверхностных осадках. Вероятно, это связано с тем, что обстановка на севере НГБ была под большим влиянием сезонных льдов и талой воды при их разрушении (Лукашина, 2008; Werner et al., 2013; Telesiński et al., 2015). После 1.1 тыс. л.н. численность и состав сообществ ПФ и БФ в НГБ и ССА восстанавливаются, и условия сменяются на современные, гораздо более тепловодные.

Каждый раздел в конце включает краткий вывод о палеоокеанологических условиях в исследованных МИС и хронозонах, а **раздел 5.8** содержит основные выводы по всей **Главе 5**.

Заключение

Результаты диссертации разделяются на три направления.

Микропалеонтология БФ. Подтверждены имеющиеся и получены новые данные по распределению и экологии видов-индикаторов, стратиграфически важных видов, доминирующих групп БФ, в зависимости от среды обитания и глубины моря.

Получены новые результаты по распределению индикаторных видов БФ в четвертичных осадках НГБ:

а) уточнены биостратиграфия и географическое распространение региональных стратиграфических видов-маркеров *S. rolshauseni* и *P. bulloides*;

б) выявлено совместное появление видов *E. exigua* и *O. umbonatus* в сообществе, которое отражает их похожую реакцию на быстрое поступление ОВ на дно во время межстадиалов и межледниковий;

в) установлена зависимость смены преобладающего вида в сообществе инфауны *E. exigua*-*O. umbonatus* от биопродуктивности поверхностных вод и режима поступления ОВ, зависящих от миграции Арктического фронта;

г) охарактеризовано сходство и различие экологических предпочтений видов в доминирующем сообществе эпифауны *C. wuellerstorfi*-*I. tumidula*. С одной стороны, оба вида реагируют на изменение климата и условий ледовитости, а с другой – они составляют конкуренцию друг другу в поверхностных осадках в зависимости от содержания кислорода и интенсивности глубинных/придонных течений;

д) дополнены сведения о распространении секреторно-известкового таксона *P. osloensis* в позднеплейстоценовых отложениях и агглютинирующих видов *A. glomerata*, *C. pauciloculata*, *T. conica*, *Haplophragmoides* sp. и *R. contortus* в голоценовых осадках.

Статистическая обработка данных. С помощью современных методов кластерного и

статистического анализа по данным БФ получены новые результаты в исследовании разрезов коротких и длинных колонок. Стратиграфическая и групповая кластеризации подтверждают климатостратиграфическое подразделение разрезов отложений и предоставляет дополнительную информацию о распределении БФ в различных интервалах.

В результате применения статистического подхода определены сходные и различные интервалы, объединены сообщества в толщах отложений и выделены в них доминирующие и малочисленные виды. Соответственно, совместное нахождение видов в одном поле диаграммы дает возможность ассоциировать интервалы и группу видов со схожими условиями или обстановками. Для малоизученных, в частности, «оппортунистических» видов, можно предположить их экологические предпочтения, основываясь на полученной статистике и группировке с использованием хорошо изученных видов-индикаторов.

При этом следует учитывать неоднородность материала, которая может приводить к менее четкой или менее надежной интерпретации: смещению или размытию границ, фораминиферных групп и временных интервалов.

Палеоокеанология. Результаты работы позволили установить хронологию палеоокеанологических событий в ССА и НГБ за последние 280 тыс. лет (конец среднего и поздний плейстоцен, голоцен – в пределах МИС 8–1), описать их особенности и синхронизировать с этапами изменения регионального палеоклимата. Исследованный интервал содержит три геологические эпохи (средний плейстоцен, поздний плейстоцен и голоцен), включающие крупные оледенения и межледниковья, резкие переходы между ними, потепления и похолодания тысячелетнего масштаба (хронозоны бёллинг-аллерёд и поздний дриас в позднем плейстоцене), а также кратковременные события голоцена. Результаты микропалеонтологического анализа использованы в сочетании с седиментологическими и изотопно-геохимическими данными.

Дополнены высокоразрешающие данные и реконструированы климатические высокоамплитудные изменения для МИС 8–7 и МИС 4–3, в частности, по отдельным дегляциальным и интерстадиальным интервалам.

Сделано предположение о существовании продолжительного сезона нормально-морских и свободных ото льда условий в северо-восточной части НГБ во время предпоследнего (МИС 6) и последнего ледниковых периодов (МИС 2), когда сохранявшийся приток атлантических вод создавал высокопродуктивные обстановки для развития сообществ фораминифер.

Распространение индикаторных видов эпифауны БФ в исследуемых отложениях свидетельствует об изменениях интенсивности придонных/глубинных течений и их степени насыщенности кислородом в разных частях НГБ на протяжении МИС 6–1.

В мелководных районах Датского пролива (у западной Исландии) и СЗ шельфа Великобритании анализ БФ подтверждает проникновение холодных полярных течений в ССА и теплых атлантических вод в НГБ через Датский пролив во время МИС 5, а также влияние придонных течений в МИС 2 и конце позднего плейстоцена.

Полученные результаты апробированы в ряде публикаций в рецензируемых журналах и в

докладах на российских и зарубежных конференциях. Они прошли рецензирование и обсуждение со специалистами по микропалеонтологии и палеоокеанологии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. **Киреенко** (Лозинская) **Л.А.**, **Копяевич Л.Ф.**, **Матуль А.Г.** Позднечетвертичная палеоокеанология Норвежского моря на основе анализа бентосных фораминифер // Вестник Московского Университета. Серия 4: Геология. – 2020. – № 2. – С. 34–42. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-2-34-42.
2. **Kireenko** (Lozinskaia) **L.**, **Tikhonova A.**, **Kozina N.**, **Matul A.** Image dataset of benthic foraminifera taxa from Denmark Strait sediments on the northwestern Iceland slope (North Atlantic Ocean) // Data in Brief. – 2022. – V. 42, № 3. – P. 108040. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108040.
3. **Kireenko** (Lozinskaia) **L.**, **Tikhonova A.**, **Kozina N.**, **Matul A.** Image dataset of benthic foraminifera in multicorer and gravity corer sediments from north-western Scotland shelf (North Atlantic Ocean) // Biodiversity Data Journal. – 2022. – V. 10, № 1. – P. 87457. DOI: 10.3897/BDJ.10.e87457
4. **Клювиткина Т.С.**, **Новичкова Е.А.**, **Киреенко (Лозинская) Л.А.**, **Чеховская М.П.**, **Матуль А.Г.** Микроводоросли и климат Северной Атлантики // Природа. – 2022. – № 11. – С. 48–53. DOI:10.7868/S0032874X22110059.
5. **Клювиткина Т.С.**, **Агафонова Е.А.**, **Новичкова Е.А.**, **Лозинская Л.А.**, **Чеховская М.П.**, **Матуль А.Г.**, **Кравчишина М.Д.** Условия осадконакопления в районе хребта Книповича (Норвежское море) в голоцене по данным анализа микрофоссилий // Вестник Московского Университета. Серия 5: География. – 2023. – № 6. – в печати