

9.4. Геохимические фракции и индикаторы условий осадконакопления в Баренцевом море

Л.Л. Демина¹, Д.Ф. Будько¹, Н.В. Политова¹, Т.Н. Алексеева¹, Е.А. Новичкова¹,
А.С. Соломатина¹, Р.А. Алиев²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Химический факультет

Приводятся результаты исследования геохимических фракций некоторых тяжелых металлов и вертикального распределения породообразующих и микроэлементов в колонках донных осадков Баренцева моря. В колонке АМК-5193 установлено абсолютное преобладание алюминия (в среднем 97% валового содержания), Cr и Ni (75–90%) в литогенной фракции на всем диапазоне опробования. Существенная доля Pb, Cd, Cu, Ni, Co, Mn и As (от 65 до 30% валового содержания) накапливается в осадках за счет гидрогенных процессов, таких как адсорбция на аутигенных Fe-Mn оксигидроксидах и глинистых частицах. В слое 0–6 см колонки АМК-5193, где происходят наиболее интенсивные обменные процессы между донными осадками и придонной водой, установлено резкое возрастание геохимически подвижных фракций большинства изучаемых металлов. В этом поверхностном слое зафиксировано максимальное содержание аутигенных оксигидроксилов Fe и Mn, которые служат эффективным сорбентом микроэлементов, в том числе, тяжелых металлов. По длине колонки АМК-5194 обнаружено ритмичное асинхронное изменение отношений Si/Al, Ti/Al и Fe/Al, которые отражают вклад терригенной матрицы, и отношения Al/Ca, принимаемого как индикатор интенсивности физического и химического выветривания. Кроме того, выявлено, что изменение отношения Ti/Al происходит в противофазе с отношением Mn/Fe, которое используется как индикатор геохимически подвижной фракции. Степень дальности аэрозольного переноса обломочного материала отражается на характере изменения Ti/Zr, которое слабо выражено по колонке АМК-5194, что подтверждает близость терригенного источника.

Ключевые слова: тяжелые металлы, донные осадки, геохимические фракции, условия осадконакопления

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(31)

ВВЕДЕНИЕ

Баренцево море является важным для России бассейном как регион, богатый минеральными и биологическими ресурсами, а также как ключевой сегмент Северного морского пути. Теплая атлантическая вода, поступающая в Баренцево море, создает благоприятные условия для развития биологических ресурсов, изучение которых важно с точки зрения экологии и обширной хозяйственной деятельности. С другой стороны, Баренцево море, расположенное на северо-европейском континентальном шельфе и связанное с Атлантическим океаном, принадлежит к арктическим бассейнам, определяющим современный климат Европы. Климатические циклы вызывают резкие изменения условий осадконакопления, которые отражаются в геохимических характеристиках осадков, поэтому исследование геохимии донных осадков как природных архивов представляет интерес для реконструкции палеосреды позднечетвертичного осадконакопления в Арктике. Осадочный материал поступает в Баренцево море в результате ледово-айсбергового разноса из Северного Ледовитого океана, с архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа и Новая Земля, а также в результате атмосферных выпадений [Лисицын, 2001; Шевченко, 2006].

Литолого-геохимический состав донных осадков служит информацией об источниках и путях транспорта осадочного материала, палеоклиматах, океанской циркуляции и биопродуктивности водных масс, окислительно-восстановительных условиях и постседиментационных изменениях осадков. Физические и биологические процессы во время выпадения осадков, объединенные с постседиментационными химическими реакциями, представляют собой сложно-компонентную систему, которая дает существенную палеоокеанологическую информацию, усиливая интерпретацию данных, полученных из изучения микрофоссилий и изотопного состава компонентов осадка.

Несмотря на значительные успехи в литолого-геохимических исследованиях Баренцева моря [Богданов и др., 2001; Гурвич и др., 2001; Стрекопытов, 2001; Гуревич, 2002; Иванова, Мурдмаа, 2001; Мурдмаа и др., 2003], до сих пор отсутствуют количественные оценки вклада различных биогеохимических процессов в накопление химических элементов в донных осадках. Исключительно важным инструментом для таких оценок служит изучение геохимических фракций элементов, позволяющее разделить две принципиально различные формы нахождения:

1) геохимически подвижную, обеспечивающую обменные, мобилизационные процессы и включение в состав органического вещества, и 2) геохимически инертную – литогенную, где элементы фиксированы в раскристаллизованных Fe-Mn оксигидроксидах и в кристаллических решетках обломочных и глинистых минералов. Высокорастворяющее исследование ненарушенных колонок донных осадков длиной до 30–50 см, полученных мультикорером или трубкой Неймисто, позволяет оценить короткопериодные (с дискретностью менее 10 лет) вариации в накоплении тяжелых металлов за исторический период, тогда как исследование колонок с длиной керна свыше 300 см, отобранных большой гравитационной трубкой (ТБД), позволяет оценить геохимические процессы в геологическом прошлом.

Перед авторами стояли следующие задачи:

1) Анализ геохимических фракций химических элементов (включая потенциально опасные тяжелые металлы (ТМ) Pb, Cd, As, Cu) в колонках с высоким разрешением слоев (дискретность 1–2 см) для получения количественной оценки вклада различных геохимических процессов в накопление в верхнеолоценовых донных осадках Баренцева моря. Методический подход заключается в последовательной экстракции исходной пробы реагентами, позволяющими разделить разные по геохимической подвижности металлы, с последующим определением концентраций металлов методом масс-спектрометрии в индуктивно-связанной плазме (ИСП-МС). В осадках, взятых с шагом 1 см из поверхностного слоя (0–35 см) трубкой Неймисто (ТН) на ст. АМК-5193, а также отобранных мультикорером (МК) на ст. АМК-5548, АМК-5555 и АМК-5579, выполнен анализ форм нахождения тяжелых металлов. Последние три станции расположены на меридиональном Кольском океанографическом разрезе (вдоль 34° в. д.) протяженностью около 700 км, начиная от мелководья на юге до глубин около 450 м на севере (80° с. ш.).

2) На основе данных многоэлементного анализа в четырех колонках высокого разрешения (МК и ТН) и одной колонки ТБД выявить геохимические индикаторы для оценки палеоусловий формирования осадков.

В фундаментальных монографиях [Calvert, Pedersen, 2007; Юдович, Кетрис, 2011] систематизирован обширный фактический материал по литологической геохимии, выделен широкий спектр геохимических индикаторов климатических обстановок для осадочных разрезов. К геохимическим индикаторам палеоклимата, в первую очередь, относятся такие классические показатели, как титановый модуль TiO_2/Al_2O_3 в осадках [Мигдисов, 1960]. Обогащение осадков

фосфором служит характерным признаком гумидных зон, тогда как о потеплении палеоклимата свидетельствует увеличение содержания в осадках некоторых малых элементов (Pb, Zn) [Юдович, Кетрис, 2011]. Интересно, что, поскольку биофильный Zn концентрируется опаловыми створками диатомовых, отношение $(Zn/Si)_{опал}$ в антарктических диатомеях может служить косвенным индикатором климатических обстановок, т. к. это отношение зависит от опреснения, связанного с таянием материковых льдов [Hendry, Rickaby, 2008]. Отношение Sr/Ca и Rb/Sr в биогенных карбонатных осадках Южной Атлантики служит геохимическим показателем климатических изменений: ледниковые периоды характеризуются минимальными значениями Sr/Ca, межледниковья – высокими отношениями Sr/Ca и Rb/Sr [Wien et al., 2005].

Обогащение осадков в активную стадию последнего оледенения материалом ледового разноса [Heinrich, 1988] диагностируется не только по терригенным зернам IRD, но и по геохимическим индикаторам Ca/Sr, Zr/Ca, $C_{орг}$, C/N, как это показано в разрезах обломочных карбонатных пород к западу от архипелага Шпицберген [Winkelmann et al., 2008]. Благодаря использованию таких экспрессных методов как рентгено-флюоресцентная спектроскопия (РФА), стал возможен многоэлементный анализ, позволяющий получить данные по породообразующим и микроэлементам из одной навески пробы. Это позволяет интерпретировать данные не по одному, а по ряду индикативных элементов и их отношений. Так, по Al/Si, Fe/Ca, Ti/Al, Zr/Al можно оценить вариабельность обломочных компонентов в позднечетвертичных разрезах Арктики [Spoffort et al., 2008; Polyak et al., 2009].

В данной работе представлены результаты анализа донных осадков, полученных в рейсах 67 и 68 НИС «Академик Мстислав Келдыш» (2016 и 2017 гг.). Выполнен анализ 162 проб из высокоразрешающих колонок, взятых мультикорером (МК) и трубкой Неймисто (ТН) в открытой части моря (ст. АМК-5193), на границе с Норвежским морем (ст. АМК-5432), из Кембриджского пролива у Земли Франца-Иосифа (ст. АМК-5454) и из бухты Русская Гавань Новой Земли (ст. АМК-5424), с последующим разделением на слои толщиной 1 см. Из центральной котловины исследована одна колонка (ст. АМК-5194 ТБД) с длиной керна 460 см.

Анализ содержания химических элементов (Al, Si, Ti, Mn, Mg, Fe, V, Sr, Zr, Ba, Sc, As, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Pb) проведен методами атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС – пламенной и электротермической), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС), а также рентгено-флюорес-

центной спектроскопии (РФА). Методом последовательной химической экстракции выделяли четыре формы нахождения ТМ: 1) адсорбционно-обменный комплекс и карбонаты [Luoma, Bryan, 1981]; 2) Fe-Mn гидроксиды и адсорбированные на них металлы [Chester, Hughes, 1967]; 3) ТМ, связанные с органическим веществом [Kitano, Fujiyoshi, 1980]; 4) литогенная (остаточная). Первые три формы позволяют оценить вклад геохимически подвижных металлов, тогда как четвертая является геохимически инертной формой. Кроме этого, определено содержание органического и карбонатного углерода кулонометрическим методом. Правильность анализа химических элементов контролировали с помощью стандартных образ-

цов донных осадков отечественного (СДО-1, -3) и иностранного производства (NIST 2703).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В изученных донных осадках Баренцева моря валовые концентрации тяжелых металлов Zn, Cu и Pb в большинстве случаев не превышают фоновых значений для этого региона, в то время как более чем в половине проб концентрации Cr на 20% выше фоновых. Концентрации Ni и Co почти во всех пробах на 30–60% выше фоновых значений, что может свидетельствовать о влиянии антропогенного фактора (добыча и переработка кобальто-никелевых руд на Кольском полуострове).

Таблица 9.4.1. Сопоставление средних измеренных и фоновых ($C_{\text{фон}}$) содержаний тяжелых металлов (мкг/г сух. в.) в поверхностных донных отложениях Баренцева моря

	Co	Ni	Cu	Pb	Zn	Cr
Данная работа ($n=52$)	20	39	21	18	69	85
$C_{\text{фон}}$, [Новиков, Жилин, 2016]	12	30	35	30	150	70

Анализ парных корреляций показал, что с породообразующими элементами Al и Si, суммарное содержание которых в осадках составляет в среднем 36%, не коррелирует большинство изученных микроэлементов. Исключение составляют Ti и Zr, которые проявляют тесную корреляционную связь с Al и Si. Для Ti и Zr характерно нахождение в составе акцессорных минералов (рутила и циркона соответственно) с высоким значением твердости, характеризуются повышенным содержанием в песчаной фракции, где также преобладают устойчивые к истиранию (измельчению в процессе выветривания) кварц и каркасные алюмосиликаты.

Коэффициенты корреляции между Mn и Fe во всех пробах достаточно высокие (R^2 от +0.46 до +0.95), что подчеркивает общность их геохимического поведения в поверхностных осадках. Кроме того, эти элементы показывают значимые положительные корреляции с Mg (со средним содержанием 1.7%), который является структурным элементом слоистых глинистых минералов, в частности, монтмориллонита, хлорита и иллита. Глинистые минералы в донных осадках – продукт химического выветривания алюмосиликатов, по размерности частиц это тонкодисперсное вещество, обладающее повышенной сорбционной ёмкостью. То же самое можно сказать и о Fe-Mn оксигидрооксидах, поэтому положительная корреляционная связь между ними вполне закономерна.

Очень важно отметить, что с Mg, Fe и Mn коррелирует большинство тяжелых металлов: Co, V, Pb, As, Cu, Zn. Промежуточное положение занимают хром и никель, для которых отмечается положительная корреляционная связь как с Al, Ti и Zr, так и с Mg, Fe, Mn.

Геохимические фракции тяжелых металлов в поверхностных донных осадках

В данной работе впервые получена количественная оценка вклада различных геохимических процессов в накопление в верхнеголоценовых донных осадках Белого и Баренцева морей группы (Al, As, Fe, Cd, Cu, Co, Cr, Mn, Mo, Ni, Pb) на основе изучения их физико-химических форм в колонках длиной до 40 см с высоким разрешением слоев (дискретность 1–2 см).

Колонка АМК-5193 верхнеголоценовых баренцевоморских морских донных осадков, преимущественно (в среднем 90%) пелитовой размерности, отобрана трубкой Неймисто длиной 37 см (ст. 5193, 73°20.068' с. ш., 43°40.895' в. д., глубина моря 328 м, $n=22$). Средняя скорость осадконакопления составляет в центральной части Баренцева моря – 0.16 мм/год [Иванова, Мурдмаа, 2001], т. е. предположительно изучаемая колонка сформировалась за период около 2300 кал. л. н. По нашим данным, содержание кислорода в придонном слое воды в Баренцевом море (5.9 мл/л) способствует формированию в слое 0–2 см окисленных поверхностных осадков коричневого цвета. В слое 0–2 см колонки АМК-5193

pH=7.0 и редокс-потенциал $Eh = +201$ мВ, тогда глубже 2 см pH и Eh составляют соответственно 8.0 и +140 мВ, т. е. среда становится слабощелочной, окисленные осадки сменяются серо-коричневым и далее с глубиной – серым алевритовым пелитом с примесью песка. Содержание $C_{орг}$, повышенное до 2% в поверхностных слоях, с глубиной уменьшается в два раза, резкое снижение $C_{орг}$ отмечено на гор. 14 см (рис. 9.4.1).

Наши данные по колонке АМК-5193 в Баренцевом море впервые показали, что Al, являясь породообразующим элементом, накапливается по всей длине обеих колонок исключительно за счет геохимически инертной литогенной формы, составляющей в среднем 97% от общего содержания (рис. 9.4.2, а). Наиболее близкими к Al по вкладу литогенной формы оказались Fe, Cr и Ni (75–90% от общего содержания) на всем интервале опробования. Железо в подповерхностных слоях (до 3–6 см) примерно поровну распределяется между литогенной формой и суммой подвижных форм (рис. 9.4.2, б), при этом повышена доля органически-связанной формы (Fe-3) – 15–20% от суммы форм. В нижележащих слоях колонки АМК-

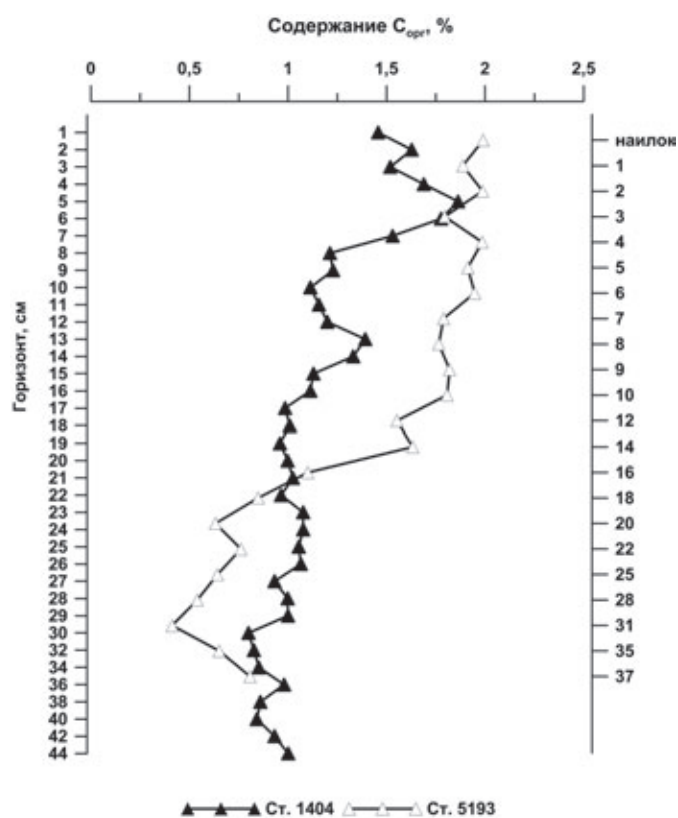


Рис. 9.4.1. Распределение органического углерода ($C_{орг}$) в колонках ненарушенных осадков, отобранных трубкой Неймисто, АМК-5193 (центральная котловина Баренцева моря) и 1404 (Белое море)

5193 литогенная форма Fe возрастает, составляя около 80% от его суммарного содержания. Уменьшение содержания Fe в форме аморфных оксигидроксидов свидетельствует о диагенетических процессах восстановления Fe^{3+} в Fe^{2+} , однако, кинетика этого процесса более медленная по сравнению с Mn. Адсорбированная форма Fe имеет подчиненное значение в осадках Баренцева моря (рис. 9.4.2).

В колонке АМК-5193 отмечено низкое содержание Mn (в среднем в 4 раза меньше, чем в Белом). В поверхностном слое осадков (0–2 см) аморфные гидроксиды Mn (форма-2) составляют всего около 30% от суммы форм, здесь высока доля геохимически подвижных форм Mn (80% от общего содержания), среди которых преобладает адсорбированная/связанная с карбонатами форма Mn-1 (50% от суммы форм) (рис. 9.4.2, г). Общее содержание Mn в верхнем окисленном осадке (850 мкг/г сух. в.) близко к кларку в осадочных породах. Судя по низкому градиенту уменьшения валового содержания Mn ($gradC_{Mn} = \Delta C / \Delta L = 132$ мкг/см), десорбционные и восстановительные процессы протекают значительно медленнее, чем в Белом море [Демина и др., 2017], общее содержание Mn снижается на горизонте 4 см всего в 3 раза по сравнению с наилком (рис. 9.4.2). При этом в иловой воде содержание растворенного Mn на горизонте 1–2 см резко увеличивается более чем в 100 раз (до 830 мкг/л). Другим важным отличием баренцевоморской колонки является преобладание литогенной формы Mn-4 (50–70% от общего содержания) в осадках глубже 4 см (рис. 9.4.2).

Вклад литогенной формы в накопление As, Co, Cu, Cd, Pb варьирует от 65% (As, Co) до 30% (Cd). Содержание литогенной формы металлов минимально в окисленном наилке на границе вода–дно (0–1 см), где наиболее интенсивны обменные процессы между твердой и жидкой фазами донных осадков. По длине колонки роль литогенной формы слабо возрастает (рис. 9.4.2).

Геохимически подвижные формы Cu, Pb, Co и Ni (адсорбированные на глинистых минералах, Fe-Mn аморфных гидроксидах и связанные с ОВ) не превышают 50% валового содержания каждого из этих металлов, составляя в среднем от 26 до 38%. В пределах верхнего слоя 0–10 см доля геохимически подвижных форм Ni, Cu и Pb заметно выше, чем в нижележащих осадках, где отмечено их равномерное распределение.

В колонке АМК-5193 в верхних 4 см форма Mn-2 снижается в 4.5 раза, тогда как форма Fe-2 всего в 2.5 раза. Следует отметить, что, согласно литологическому описанию, в колонке АМК-5193 встречаются стяжения гидротроилита, т. е. форма Fe-3 может быть

представлена не только органическим веществом, но и сульфидами, образовавшимися при сульфатредукции. Это подтверждается возрастанием вниз по колонке формы Fe-3, несмотря на уменьшение содержания C_{org} (рис. 9.4.1).

В результате концентрация Fe в иловых водах (ст. 1404) возрастает не столь резко, как Mn: с глубиной залегания слоя – от 3.6 (на 2 см) до 35.8 мкМ (на 18 см) (рис. 9.4.3).

Отношение Mn/Fe используется для палеорекострукции динамики кислорода в среде осадкообразования поскольку, чем ниже концентрация кислорода, тем ниже значение Mn/Fe [Naeher et al., 2013]. По нашим данным, отношение Mn/Fe в адсорбированной форме и в форме аморфных гидроксидов на гор. 3 см колонки АМК-5193 резко уменьшается по сравнению с наилком: от 0.9 до 0.05 (почти в 20 раз). Аналогичное явление, отмеченное нами ранее и для беломорской колонки ст. ПШ-1404 (рис. 9.4.4) [Будько и др., 2017], по-видимому, обусловлено различиями в кинетике окисления-восстановления Mn и Fe: в слабо восстановленной среде Fe окисляется быстрее, чем Mn, а Mn восстанавливается быстрее, чем Fe. То есть обменные

процессы более интенсивны в случае Mn по сравнению с Fe. Интересен тот факт, что, несмотря на разные значения Mn/Fe в беломорской и баренцевоморской колонках, характер изменения отношения Mn/Fe в обоих случаях имеет одинаковую направленность. Отметим, что отношение Mn/Fe в геохимически инертной литогенной форме остается практически постоянным по всей длине колонок (рис. 9.4.4).

Наряду с Mn, Mo относится к числу наиболее чувствительных металлов к изменению редокс условий среды осадконакопления. При этом для Mo характерна адсорбция на аморфных гидроксидах Mn и включение в состав сульфидов [Pilipchuck, Volkov, 1974]. Нами установлена прямая корреляционная зависимость для валового содержания Mo и Mn на ст. АМК-5193 ($R=0.72$; $p=0.05$). В поверхностных слоях Mo, связанный с аморфными оксигидроксидами марганца (форма Mo-2), резко убывает: с 1.06 до 0.21 мкг/г сух. в. (т. е. в 5 раз), что очевидно обусловлено его десорбцией из аморфных Mn-гидроксидов при восстановлении Mn^{4+} .

Наибольшую склонность к связыванию с ОВ проявляют Cu и Mo: органически связанная фор-

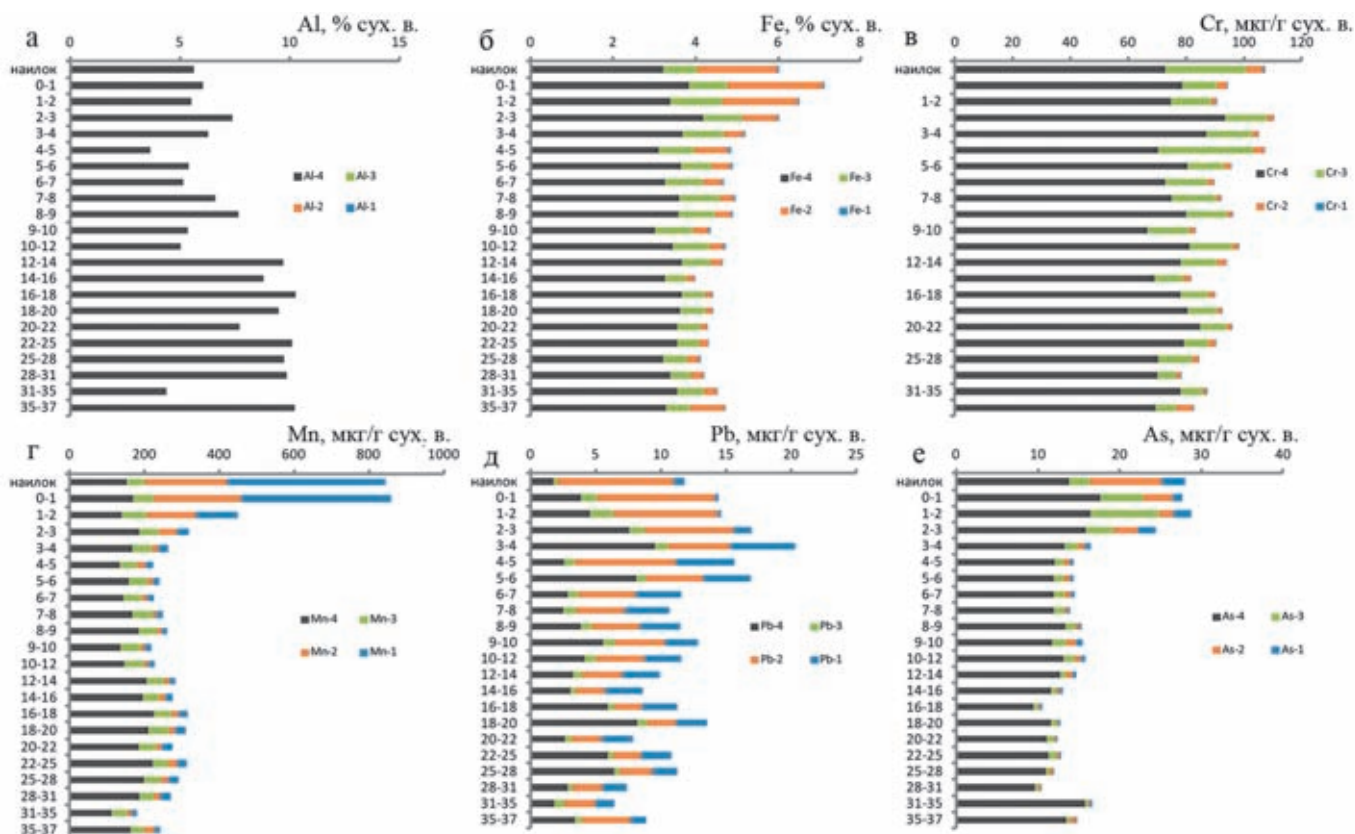


Рис. 9.4.2. Содержание геохимических фракций в ненарушенной колонке ст. АМК-5193 из центральной котловины Баренцева моря:

а – Al, % сух. в., б – Fe, % сух. в., в – Cr, мкг/г сух. в., г – Mn, мкг/г сух. в., д – Pb, мкг/г сух. в. и е – As, мкг/г сух. в. Фракции элементов (Эл.): Эл.-1 – адсорбированная и связанная с карбонатами; Эл.-2 – аморфные гидроксиды Fe и Mn и связанные с ними микроэлементы; Эл.-3 – связанная с органическим веществом и/или сульфидами; Эл.-4 – литогенная

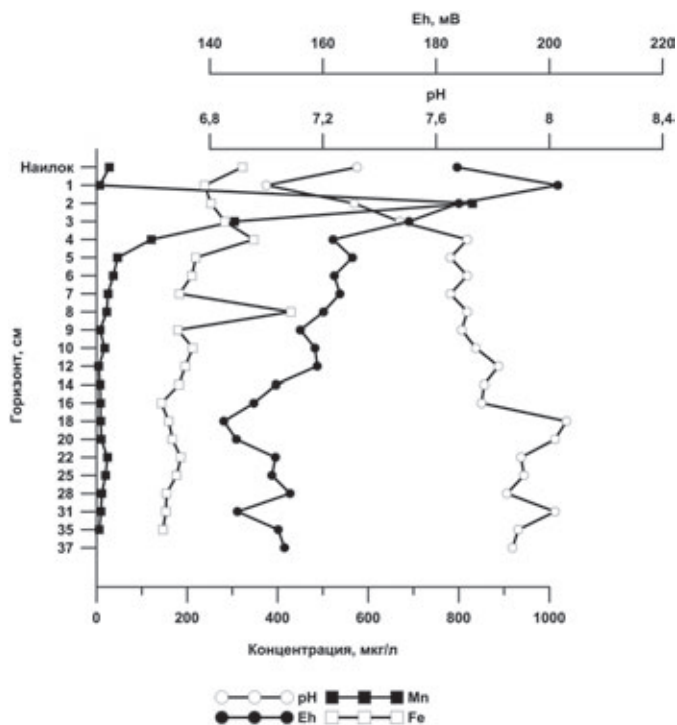


Рис. 9.4.3. Распределение Mn и Fe (а) и изменчивость показателей pH (б) и окислительно-восстановительного потенциала Eh (в) в иловой воде ст. AMK-5193

ма Си-3 и Мо-3 составляет в среднем 35–50% в поверхностных слоях с содержанием $C_{орг} > 1.5\%$; причем у Си по всей колонке наиболее тесная связь с $C_{орг}$ ($R^2=0.90$; $p=0.05$). Для Cd и Pb характерна повышенная по сравнению с Си адсорбция как на глинистых минералах (форма-1), так и на аморфных Fe-Mn гидроксидах (форма-2) и Fe ($R=0.85$; $p=0.05$), которые сопоставимы и даже превышают вклад

литогенной формы в верхних частях колонок. Интересно, что доля адсорбированной формы-1 Cd, Co, Cu имеет тенденцию к увеличению с глубиной осадка. Это говорит о том, что эти элементы, перешедшие в раствор при десорбции из Fe-Mn оксигидроксилов и деструкции ОВ, сорбируются на глинистых частицах. В этом заключается обменный механизм между геохимически подвижными формами. Металлоид As накапливается в поверхностном слое благодаря адсорбции на аморфных Fe-Mn гидроксидах: в среднем до 30% от суммы форм в колонке АМК-5193 (рис. 9.4.2, е). В нижних частях колонок доминирует литогенная форма As (80–90% от общего содержания).

В верхнем 10-см слое осадка происходят циклические процессы окисления-восстановления Mn: осаждение его в подвижных гидроксидных формах в вертикальных потоках осадочного материала, восстановление в результате диагенетических процессов и миграция из донных осадков в иловую воду, при диффузных потоках которой к поверхности дна Mn окисляется, формируя твердую гидроксидную фазу в поверхностном слое.

Анализ геохимических фракций тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Ni, Co, Mn) и мышьяка в донных осадках Баренцева моря выявил значительную роль гидрогенных процессов (адсорбция на аутигенных Fe-Mn оксигидроксидах и глинистых частицах, вхождение в состав ОВ) в их аккумуляции в осадках, тогда как Fe и Сг накапливаются в осадках преимущественно за счет терригенных процессов.

В трех исследованных колонках Кольского разреза валовое содержание Mn убывает с глубиной (в

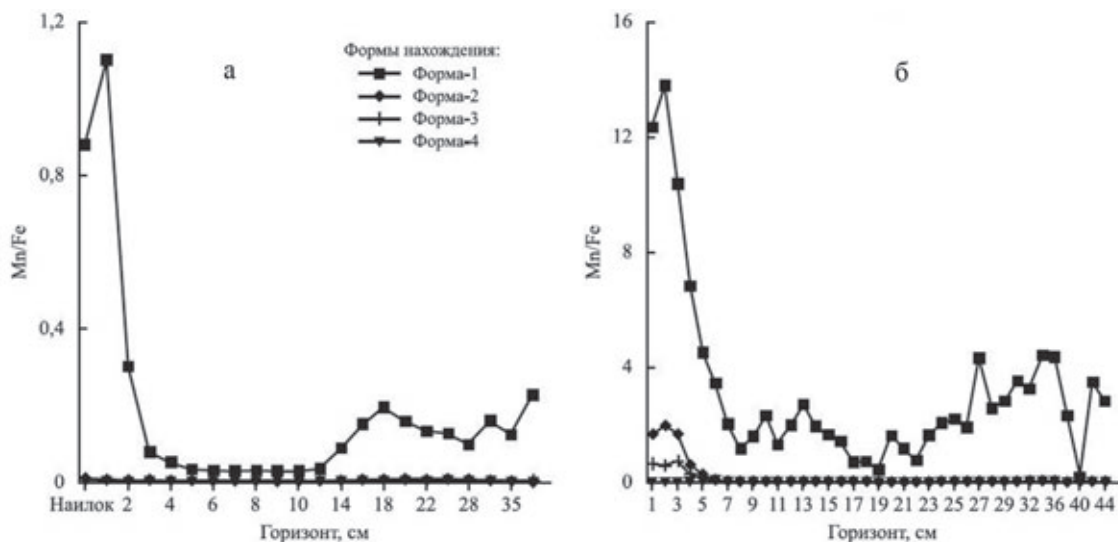


Рис. 9.4.4. Изменчивость отношения Mn/Fe в ненарушенных осадках (ТН) ст. AMK-5193 в Баренцевом море (а) и ст. 1404 в Белом море (б)

1.5–2.5 раза), причем на ст. АМ-5555, находящейся на удалении от берега, это проявляется наиболее ярко (в 12 раз) и может быть связано с повышенным содержанием $C_{\text{орг}}$ (до 1.78%) и более интенсивными диагенетическими процессами. По мере отдаления от береговой линии условия динамически более спокойные, контактный слой вода – донные отложения (наилки) прослеживается чётче. В наилке и подповерхностных слоях происходит окисление Mn^{2+} до Mn^{4+} из иловых вод, высаживание в твердую фазу MnO_2 (аморфный гидроксид) и адсорбция на его поверхности тяжелых металлов.

В осадках прибрежной ст. АМК-5579 для Cu очевидно преобладание форм, связанных с органическим веществом и сульфидами, эта фракция Cu составляет в среднем от 58 до 74% от суммы подвижных форм (рис. 9.4.5, а). Для свинца характерно преобладание в адсорбированной на Fe-Mn оксигидроксидах форме (рис. 9.4.5, б), тогда как Ni примерно поровну (46–49% валового содержания) распределяется между адсорбированной на Fe-Mn оксигидроксидах и органически связанной формами (рис. 9.4.5, в). В центральной котловине время формирования поверхностного слоя голоценовых осадков (0–10 см) охватывает период ~50–60 лет, в течение которого техногенная нагрузка горнодобывающей отрасли на бассейн возростала. Это, по-видимому, отразилось на пиках общего содержания тяжелых металлов, обусловленных увеличением доли их геохимически подвижных форм в поверхностном слое. В прибрежных разрезах с глубиной уменьшается количество форм, связанных с аморфными гидроксидами Fe и Mn.

Геохимические индикаторы

Геохимическими индикаторами гранулометрического состава в колонках донных осадков считаются отношения Si/Al и Ti/Al , повышенное значение которых обусловлено преобладанием песчаных, а также крупно- и средне-алевритовых фракций, представленных в основном кварцем, полевыми шпатами и устойчивым к выветриванию рутилом. В дегляциальные периоды, когда преобладает физическое выветривание, в осадках возрастают значения Si/Al , Ti/Al и Ti/Zr [Calvert, Pedersen, 2007].

Особенности окислительно-восстановительных процессов прослеживаются по характеру изменения отношения Mn/Fe , обусловленного различиями в окислительно-восстановительной кинетике этих элементов: увеличение Mn/Fe происходит в окислительных условиях осадконакопления, а понижение – в восстановительных. В колонке из хребта Ломоносова чередование обогащенных и обедненных марганцем слоев связано с ледниковыми и межледниковыми пе-

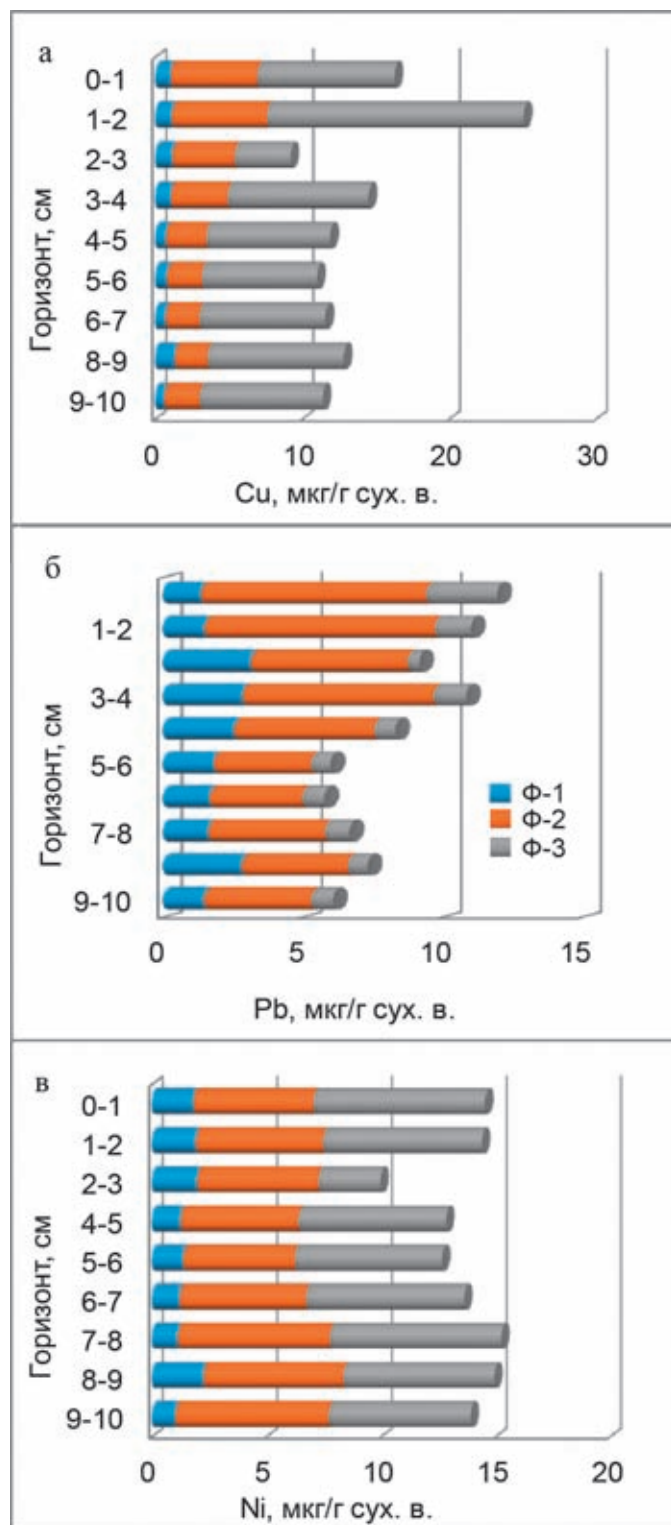


Рис. 9.4.5. Распределение подвижных фракций Cu (а), Pb (б) и Ni (в) в поверхностном слое 0–10 см на ст. 5579 (вблизи берега).

Фракции элементов (Ф): Ф-1 – адсорбированная и связанная с карбонатами; Ф-2 – аморфные гидроксида Fe и Mn и связанные с ними микроэлементы; Ф-3 – связанная с органическим веществом и/или сульфидами

риодами: высокое содержание Mn фиксировалось в межледниковье, тогда как низкое – в ледниковые периоды [Jakobsson et al., 2000; Calvert, Pedersen, 2007].

В обогащенных марганцем слоях обнаружены повышенные содержания тяжелых металлов, а также карбонатов как биогенных, так и терригенных, связанных с ледовым разносом [Hanslik et al., 2013]. Условия гипо- или аноксии приводят к изменению содержания редокс-чувствительных и сульфид-образующих металлов (Mo, V, U, Ag, Cd и Zn), а также отношения Mn/Fe в донных осадках [Chester, 2000; Tribovillard et al., 2006; Naehrer et al., 2013]. Тяжелые металлы эффективно концентрируются в окислительно-восстановительных циклах железа и марганца, проявляя в некоторых случаях индикаторные свойства.

Колонка АМК-5194 ТБД

Мы исследовали изменение химического состава осадков колонки АМК-5194 ТБД (длина 445 см), поднятой в Центральной впадине Баренцева моря. Эта колонка расположена немного южнее ст. АСВ-858, всесторонне изученной в работах [Мурдмаа, Иванова, 1999; Иванова, Мурдмаа, 2001; Богданов и др., 2001; Гурвич и др., 2001]. Ст. АСВ-858 охватывает стратиграфические горизонты: верхний голоценовый (I), сформированный в морских условиях, и два нижележащих слоя, сформированных в ледниково-морских условиях: переходный – поздней дегляциации (II) и нижний – дегляциальный (III). Голоценовая толща 0–207 см включает этапы (сверху вниз): Ia – поздний, Ib – максимум биопродуктивности, Iv – климатический оптимум и Ig – ранний. Голоценовые отложения отличаются повышенными и сильно изменчивыми

содержаниями C_{org} , Cu, Ni, V, Sr, Cr, Mn, Ba и Ti, превышающими средние содержания в дегляциальных осадках, что очевидно обусловлено высокой биопродуктивностью вод [Гурвич и др., 2001]. Средние скорости осадконакопления в голоцене не превышали 10 см/тыс. лет. Дегляциальные осадки (толща ниже 207 см) формировались в более холодном климате, когда главная роль в транспорте элементов в осадки принадлежала продуктам ледниковой деятельности, представлены верхнеплейстоценовым алеврито-пелитовым илом с заметным содержанием песка. Дегляциальные отложения, накопившиеся ранее 10 тыс. лет, характеризуются минимальной изменчивостью химических элементов, обусловленной единственным в тот период эоловым источником осадочного материала [Гурвич и др., 2001].

В табл. 9.4.2 приведены средние концентрации элементов в колонке ст. АМК-5194, осадки которой по содержанию Al, Mg, Ti, Mn, Ni, Cu, Pb и As мало отличаются от кларков литосферы. Однако они заметно обеднены Sr, Cr и, особенно, Ca (почти в 4 раза) и незначительно (15–40%) обогащены Fe, K, Zn и Si. Анализ парных корреляций выявил значимые ($p < 0.05$) коэффициенты корреляции только для Fe-Mn ($R^2 = 0.599$) и Zn-Cu ($R^2 = 0.709$). Вариации по колонке главных литогенных элементов (Si, Al, Ti, Fe), а также Ca, Mg, тяжелых металлов Cr, Pb, Zn, Cu, Ni и металлоида As показаны на рис. 9.4.6. Относительно низкие концентрации тяжелых металлов, по видимому, свидетельствуют о слабом дополнительном поступлении осадочного вещества природного и/или антропогенного генезиса в центральную котловину бассейна.

Таблица 9.4.2. Сопоставление средних содержаний химических элементов в донных осадках ст. АМК-5194 (ТБД, $L=460$ см, $n=42$) и в верхней части земной коры [Wedepohl, 1995]*

Станция	%							
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	K	Ti	Mn
АМК-5194	24.4	8.29	5.07	1.02	2.15	2.8	0.48	0.05
Верхняя часть земной коры*	28.8	7.96	4.32	3.85	2.20	2.14	0.40	0.07
	10–4%							
	Zr	Sr	Cr	Zn	Ni	Cu	Pb	As
АМК-5194	193	165	75	107	50	31	16	12
Верхняя часть земной коры*	203	333	126	65	56	25	15	11

Примечание. L – длина колонки, n – число проб.

Отметим необычайно низкое содержание Ca (сред. 1.02%), которое в 2–3 раза ниже, чем Mg, а также Mn (сред. 0.05%). Наши данные по низкой карбо-

натности осадков центральной котловины (ст. 5193), составляющей 2.49% (рис. 9.4.1), также в очередной раз подтверждают терригенный характер донных

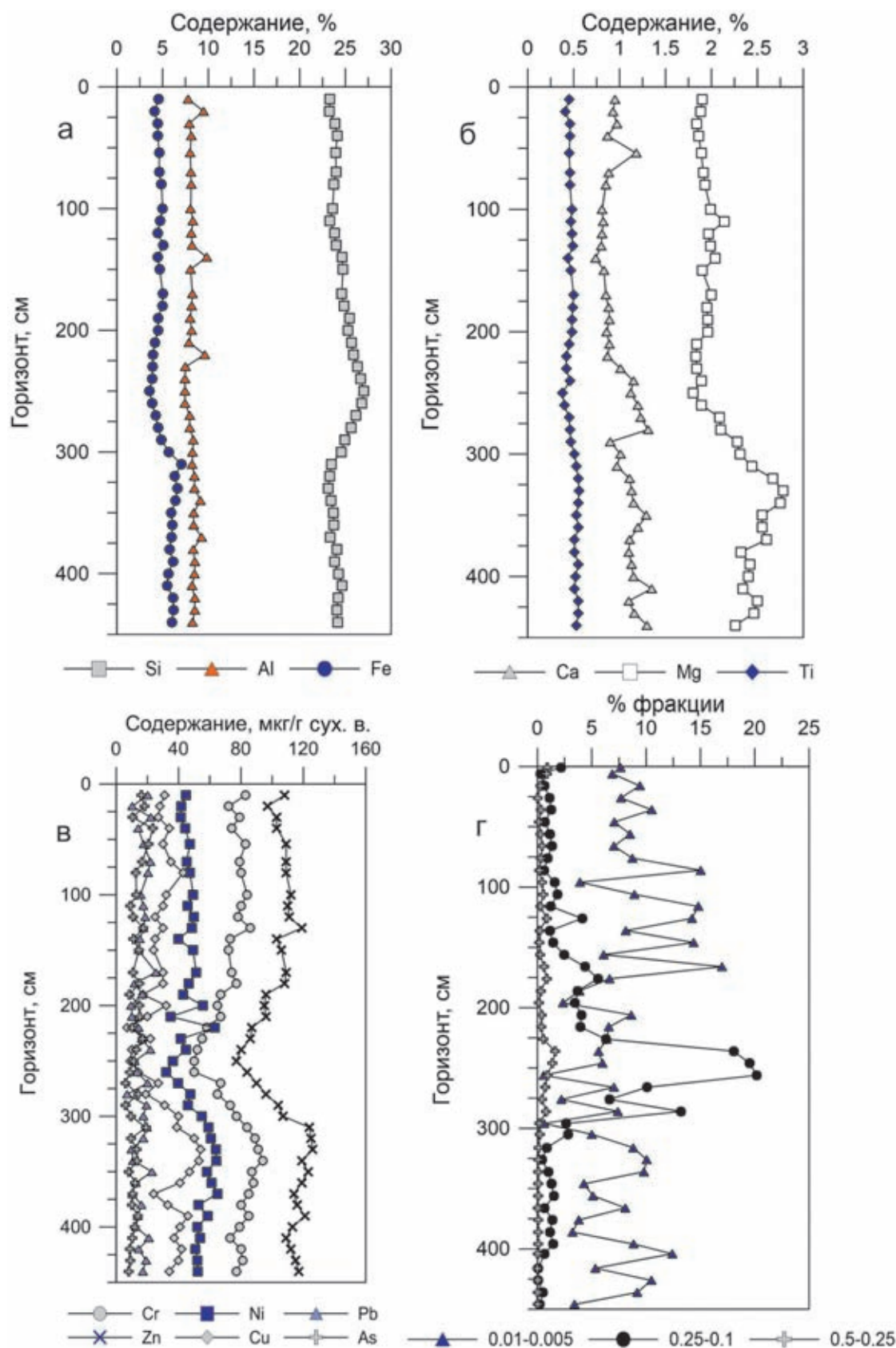


Рис. 9.4.6. Вариации содержания породообразующих элементов Si, Al, Fe (а); Ca, Mg, Ti (б); тяжелых металлов Ni, Cr, Zn, Pb, Cu и металлоида As (в), а также гранулометрических фракций средне- и мелкозернистого песка и пелита (г) в колонке донных отложений ст. АМК-5194 ТБД из центральной котловины Баренцева моря

осадков. Сумма средне- и мелкопесчаной фракции (0.5–0.1 мм) в слое 240–260 см достигает максимума (22%), который совпадает с повышенными значениями содержания Si (27%) и отношений Ti/Al, Al/Ca (рис. 9.4.7). Закономерно, что в этом же слое определены низкие значения Al, Fe, Ca, всех микроэлементов, а также минимальные отношения Fe/Al. Слои с повышенным содержанием пелитовой фракции, напротив, обеднены Si, но относительно обогащены Fe, Al, Ca и микроэлементами.

Изменчивость по колонке ст. АМК-5194 отношений элементов Si/Al, Fe/Al, Al/Ca, Ti/Ca, Mn/Fe, Ti/Al и Zr/Al показана на рис. 9.4.7. По всей длине колонки преобладает фракция <0.01 мм с небольшими вариациями в пределах 75–85%, ниже 200 см в осадках содержание фракции >0.1 мм колеблется около 10–15%. Очевидно, подобный гранулометрический состав способствует «сглаженности» или незначительной изменчивости отношения Si/Al и Ti/Ca по сравнению с величиной Al/Ca (рис. 9.4.7, а) и Fe/Al (рис. 9.4.7, б). Отметим ритмичность изменения по колонке этих трех показателей, причем изменение Al/Ca, указывающее на условия физико-химического выветривания, происходит асинхронно с отношениями Si/Al и Fe/Al, которые диагностируют терригенную матрицу и из-

меняются почти синхронно. Изменение титанового модуля (Ti/Al) характеризует степень механической сортировки обломочного материала [Мигдисов, 1960]. Увеличение Ti/Al происходит при возрастании доли более крупнозернистых осадков в периоды МИС-2 и 4 относительно МИС-1 и 5 в колонке из Северной Атлантики [Demina et al., 2019]. По нашим данным, вариация титанового модуля вполне закономерно находится в противофазе с изменением Mn/Fe (показателем геохимически подвижных фаз). Показатель Ti/Zr, отражающий дальность переноса обломочного материала с аэрозолями [Calvert, Pedersen, 2007], в рассматриваемой колонке выражен слабо (рис. 9.4.7, в); это подтверждает приближенность терригенного источника к исследуемой станции.

Колонки высокого разрешения (мультикорер), ст. АМК-5424, АМК-5432 и АМК-5454

На основании данных РФА по концентрации породообразующих и малых элементов в колонках высокого разрешения (дискретность отбора слоев 1 см) выполнено тестирование элементов-индикаторов (Si/Al, Ca/Al, P/Al, Mn/Fe и др.) для характеристики условий среды современного осадконакопления в разных районах Баренцева моря: фьрд Русская Га-

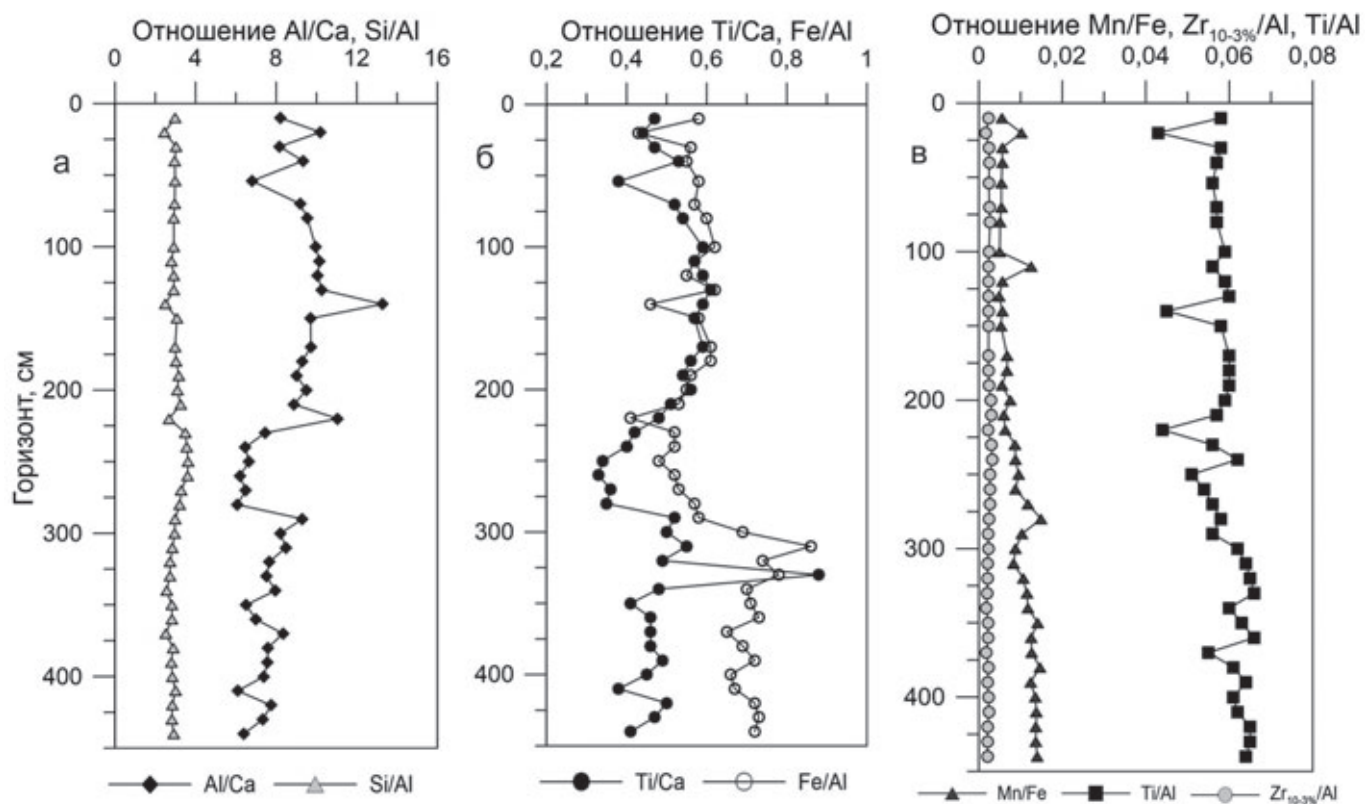


Рис. 9.4.7. Изменение отношений элементов Si/Al, Al/Ca (а), Ti/Ca, Fe/Al (б), Mn/Fe, Ti/Al, Zr_{10-3%}/Al (в) в колонке донных отложений ст. АМК-5194 ТБД из центральной котловины Баренцева моря

вань, арх. Новая Земля (ст. АМК-5424), Медвежинский желоб (ст. АМК-5432) и пролив Кембридж, арх. Земля Франца-Иосифа (ст. АМК-5454) (табл. 9.4.3).

Во фьорде *Русская Гавань* (арх. Новая Земля) осадконакопление во многом определяется выносом тонкозернистого терригенного материала тальми водами с ледника Шокальского, что подтверждается характером распределения взвеси в поверхностных водах [Айбулатов и др., 1999]. Осадки представлены преимущественно тонким пелитовым илом, обедненным $C_{орг}$ (до 0.68%) [Мурдмаа и др., 2003]. Исходя из скорости осадкообразования в колонке АМК-5424, составляющей по данным Cs-137 и Pb-210 свыше

4 мм/год и являющейся максимальной из изученных колонок, колонка длиной 24 см охватывает новейший период – от 40 до 70 лет. Отношения элементов Si/Al, Mn/Fe, Ti/Al, Ti/Zr, Zr/Al, P/Al в колонке АМК-5424 близки к таковым для верхней части земной коры. По длине колонки отношения элементов остаются постоянными, мало отличаясь от среднего значения: Si/Al (3.06), P/Al (0.009) и Mn/Fe (0.009) (рис. 9.4.8). Это свидетельствует о равномерном поступлении крупнозернистого терригенного материала, а также о слабой изменчивости окислительно-восстановительных условий в верхнем 24-см слое осадков за последние 40–70 лет.

Таблица 9.4.3. Среднее содержание химических элементов и элементные отношения в колонках донных осадков высокого разрешения (дискретность 1 см) и в верхней части земной коры [Wedepohl, 1995]*

Станция	%						10–4 %				
	Si	Al	Fe	K	Ti	Mn	Zr	Sr	Cr	Zn	Cu
АМК-5424 ($L=24$ см, $n=24$)	25.61	8.39	5.06	2.18	0.47	0.05	189	140	53	91	34
АМК-5432 ($L=25$ см, $n=25$)	30.37	6.33	2.67	1.78	0.32	0.05	230	170	44	47	27
АМК-5454 ($L=33$ см, $n=33$)	21.12	7.40	8.87	1.42	0.71	0.79	104	215	51	108	199
Верхняя часть земной коры*	28.8	7.96	4.32	2.14	0.40	0.07	203	333	126	65	25

	Si/Al	Fe/Al	Mn/Fe	Al/Ti	Ti/Zr	Zr/Al	P/Al
АМК-5424 ($L=24$ см, $n=24$)	3.06	0.60	0.009	0.056	24.87	0.002	0.009
АМК-5432 ($L=25$ см, $n=25$)	4.81	0.42	0.013	0.050	13.91	0.004	0.011
АМК-5454 ($L=33$ см, $n=33$)	2.85	1.20	0.095	0.096	68.26	0.001	0.028
Верхняя часть земной коры*	3.61	0.58	0.016	0.056	25.41	0.003	0.01

Примечание. L – длина колонки, n – число проб.

Донные осадки в *Медвежинском желобе* (ст. АМК-5432) обладают смешанным гранулометрическим составом, также присутствуют прослои с песком алевро-пелитовым и полимиктитом (алевро-галечно-пелито-песчаным). Соотношение компонентов меняется вниз по колонке: в верхнем слое до 3 см преобладающим компонентом является пелит, ниже (до 19 см) преобладает песок, который далее сменяется преобладанием пелита. По данным О.М. Дара (см. раздел 9.2 данной монографии), в минеральном составе тонкой пелитовой фракции на поверхности (гор. 1–4 см) преобладают гидрослюды (54%), которые сохраняют лидирующую позицию (38%) над другими глинистыми минералами и на гор. 24–25 см. Напротив, заметные вверху колонки смектиты (до 7.7%) практически исчезают на гор. 24–25 см, при этом содержание каолинита и хлорита возрастает вни-

зу колонки примерно на 5%, составляя около 25% каждого. Средняя скорость осадкообразования – 1.3 мм/год, вычисленная по изотопному анализу Cs-137 и Pb-210, оказалась минимальной из исследуемых трех колонок мультикорера. Исходя из средней скорости, 25-см толща сформировалась за период около 190 лет. По сравнению с кларком в литосфере, в осадках понижено содержание Al, Fe, Ti, Sr, Cr, но повышено Zr, тогда как содержание остальных элементов близко к кларковому (табл. 9.4.3).

Из рис. 9.4.8 следует, что индикаторы диагенетических изменений (Mn/Fe) и соотношения биогенных и глинистых компонент (P/Al) не изменяются по длине колонки АМК-5432. В то же время в распределении индикатора Si/Al (рис. 9.4.8, в) фиксируется четкая ритмичность: четыре пика с максимумом 5.8 в слое 0–2 см, чередуются с четырьмя низкими зна-

чениями Si/Al (~4). Это, по-видимому, отражает ритмичный характер в поступлении крупнозернистого терригенного материала, обусловленный чередованием преобладающих источников его поступления.

В проливе Кембридж (арх. Земля Франца-Иосифа) ст. АМК-5454 наибольшее влияние на процессы современного осадконакопления оказывают рельеф

и ледники, находящиеся на берегах островов архипелага Земля Франца-Иосифа. Несмотря на то, что ширина пролива около 10 км, его глубина достигает 640 м. Для береговой зоны характерны гляциальные структурные формы (фьорды), а также широко распространены троговые долины. В колонке ст. АМК-5454 преобладают пелитовые илы, окислен-

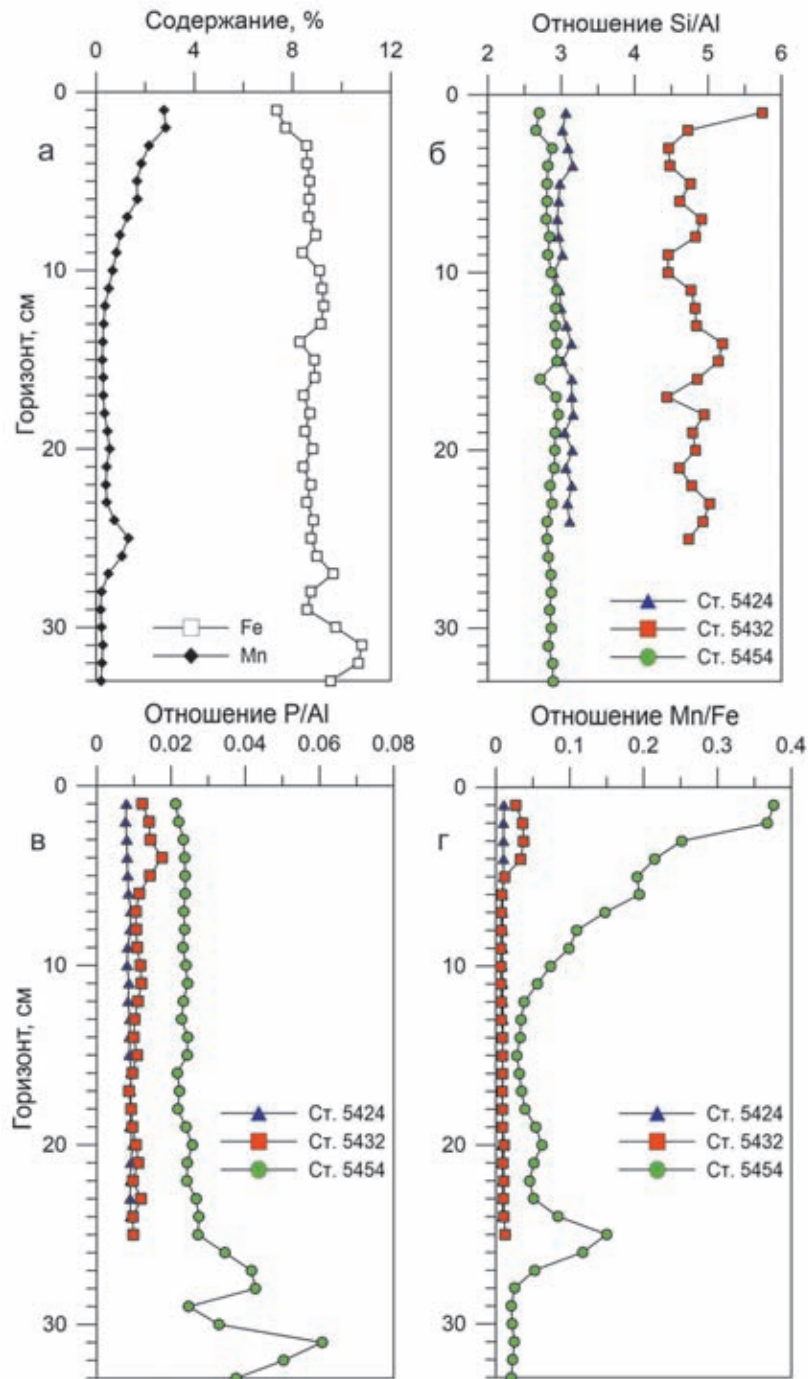


Рис. 9.4.8. Изменение содержания железа и марганца (а) и отношений элементов Si/Al (б), P/Al (в) и Mn/Fe (г) в колонках ст. АМК-5424 (Русская Гавань, арх. Новая Земля), ст. АМК-5432 (Медвежинский желоб) и ст. АМК-5454 (Кембриджский пролив, арх. Земля Франца-Иосифа)

ные, темно-серовато-коричневого (10YR/4/2) или темно-зелено-серого цвета (Gley1/3/10Y) с небольшой примесью алевритового, песчаного или гравийно-галечного материала, а также обломков раковин (1–2%). Осадки содержат от 81.25 до 93.29% фракции <0.01 мм, причем около или более 50% приходится на субколлоидную фракцию <0.001 мм. Пелитовая фракция на ст. АМК-5454 представлена смектитом (39%), гидрослюдой (32%), каолинитом (15%) и хлоритом (13%), причем в пределах 25-см колонки это соотношение практически не меняется (см. раздел 9.2). Содержание алеврита изменяется от 25 до 50%, а крупной алевритовой фракции – в пределах от 21 до 27%. В осадке наблюдаются ожелезненные пятна, стяжения, трубки. Средняя скорость осадкообразования в колонке АМК-5454, согласно датированию по изотопам Cs-137 и Pb-210, составляет 2.8 мм/год, таким образом, вся 33-см толща сформировалась за период 118 лет.

В осадках пролива Кембридж по сравнению с кларком литосферы содержание Si снижено, а Mn (0.79 против кларка 0.07) сильно повышено. Высокое содержание Mn в этой колонке согласуется с данными [Стрекопытов, 2001] по северо-восточной части моря. Кроме Mn осадки обогащены железом, причем в распределении Fe и Mn по колонке просматриваются противоположные тренды: нарастание Mn и убывание Fe снизу вверх (рис. 9.4.8, а). Среднее отношение Mn/Fe (0.793), которое почти в 5 раз превышает таковое для литосферы (0.016), резко повышается в слое 0–5 см (рис. 9.4.8, б). Вертикальное распределение отношения P/Al в осадках пролива Кембридж характеризуется более высокими (до трех раз) значениями по сравнению с фьордом Русская Гавань и Медвежинским желобом, а также пиком на гор. 32 см. По-видимому, это говорит о наличии окислительно-диагенетического изменения осадков. В колонке повышены также содержания Al, Ti, Zn и Cu, что отражает вклад глинистого материала, поставляемого тальми водами с ледников Земли Франца-Иосифа, а кроме того, биогенного материала с повышенными содержаниями эссенциальных металлов Zn и Cu вследствие более высокой биопродуктивности вод на границе Полярного фронта. Последнее подтверждается нашими новыми данными по зоопланктону из арктической водной массы Баренцева моря, обогащенного цинком и медью по сравнению с другими металлами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы геохимические фракции химических элементов в колонках донных осадков высокогорного разрешения из центральной котловины Баренцева

моря. Впервые показано, что Al, являясь породообразующим элементом, накапливается по всей длине обеих колонок исключительно за счет геохимически инертной литогенной формы (в среднем 97% от общего содержания). Наиболее близкими к Al по вкладу литогенной формы оказались Cr и Ni (75–90% от общего содержания) на всем интервале опробования. Важный вклад (от 65% до 30%) в накопление большинства тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Ni, Co, Mn) и металлоида As вносят гидрогенные процессы: адсорбция на аморфных Fe-Mn оксигидроксидах и глинистых частицах, вхождение в состав ОВ. В окисленном слое (0–6 см), где наиболее интенсивны обменные процессы между твердой и жидкой фазами донных осадков, отмечается существенное повышение доли геохимически подвижных форм металлов: здесь установлены максимальные содержания Fe и Mn в форме аморфных гидроксидов – эффективных сорбентов большинства микроэлементов, включая тяжелые металлы. Вниз по колонке роль литогенной формы возрастает.

Отношение Mn/Fe в абсорбированной форме и в аморфных оксигидроксидах можно отнести к числу геохимических индикаторов раннего диагенеза. Резкое возрастание этого отношения происходит в слое 0–5 см обогащенных пелитом осадков центральной котловины (ст. АМК-5193, АМК-5194) и в проливе Кембридж (ст. АМК-5454, арх. Земля Франца-Иосифа). Это свидетельствует о диагенетических преобразованиях, которые происходят как в современных (в пределах слоя 0–7 см), так и в раннеголоценовых, и в дегляциальных частях колонок. Минимальные вариации Mn/Fe за последние 40 и 190 лет в колонках Русской Гавани и Медвежинского желоба свидетельствуют об отсутствии диагенетического перераспределения Mn и Fe.

Распределение терригенного индикатора крупности частиц Si/Al характеризуется незначительной вариабельностью отношения Si/Al в поверхностных слоях (до 30 см) осадков из Кембриджского пролива (арх. Земля Франца-Иосифа) и фьорда Русская Гавань (арх. Новая Земля), что говорит о слабой изменчивости терригенного материала в сравнительно короткий период (до 118 лет) формирования осадков.

В длинной колонке (ТБД) АМК-5194 отмечается ритмичность изменения индикаторов Si/Al, Ti/Al и Fe/Al, диагностирующих терригенную матрицу, и Al/Ca (показателя физико-химического выветривания). Причем изменение Al/Ca происходит асинхронно с отношениями Si/Al и Fe/Al, а вариация титанового модуля Ti/Al вполне закономерно находится в противофазе с изменением Mn/Fe (показателем гео-

химически подвижных фаз). Показатель Ti/Zr, отражающий дальность переноса обломочного материала с аэрозолями, в исследуемой колонке выражен слабо, что указывает на приближенность терригенного источника. Увеличение значений терригенных индикаторов происходит синхронно с возрастанием доли более крупнозернистых осадков в периоды относительного похолодания. Вариация титанового модуля Ti/Al вполне закономерно находится в противофазе

с изменением Mn/Fe (показателем геохимически подвижных фаз).

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках Государственного задания, тема № 0149-2019-0007. Сбор материала в экспедиции проведен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-27-00114-П по направлению «Взаимодействие геосфер и минеральные ресурсы Мирового океана», руководитель академик А.П. Лисицын).

9.5. Редкие и рассеянные элементы в поверхностных донных осадках Баренцева моря. Изотопный состав Nd, Pb и Sr

А.В. Маслов¹, Н.В. Политова², Н.В. Козина², А.Б. Кузнецов³, М.Д. Кравчишина²,
А.Н. Новигатский², В.П. Шевченко², Т.Н. Алексеева²

¹ Институт геологии и геохимии им. акад. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

В настоящем разделе представлена краткая литологическая характеристика поверхностных донных осадков Баренцева моря, отобранных в 67 рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» на полигонах: 1) Печорское море; 2) Западный склон Канинского мелководья; 3) Центрально-Баренцевоморский (Штокмановский); 4) Залив Русская Гавань; 5) Медвежинский желоб; 6) в районе к югу от Шпицбергена; 7) Кольский меридиан; 8) Шпицберген – архипелаг Земля Франца-Иосифа; 9) Пролив Кембридж. Проанализировано распределение Cr, Ni, Cu, Zn, Cd и Pb в пробах поверхностных донных осадков (пелитовые, алеврито-пелитовые и песчано-алеврито-пелитовые илы, 34 пробы) в сравнении с фоновыми концентрациями и содержаниями указанных элементов в среднем постархейском глинистом сланце (РААС). Полученные данные находятся в соответствии с представлениями о том, что распределение тяжелых металлов и ряда других элементов в донных осадках Баренцева моря контролируется преимущественно глобальным геохимическим фоном. Рассмотрена связь концентраций Sc, V, Cr, Ni, Y, Zr, Nb, Mo, Hf, Th, U и редкоземельных элементов с содержанием тонкой пелитовой (<0.001 мм) фракции и органического углерода (C_{org}) в осадках. Установлено, что большинство перечисленных элементов характеризуется умеренной положительной связью с тонкой пелитовой фракцией поверхностных донных отложений. По коэффициенту корреляции с C_{org} рассматриваемые элементы подразделяются на три группы: с умеренной положительной, слабой положительной и практически не выраженной связью с C_{org} . Особенности распределения в поверхностных донных осадках Баренцева моря редких земель и таких элементов, как Sc, Th, Co, Cr, La и Sm – индикаторов состава комплексов пород-источников тонкой алюмосиликокластики позволяют считать, что преобладающая часть этих осадков сложена достаточно зрелым в геохимическом отношении материалом, источниками которого являлись породы Кольского полуострова и, по-видимому, Шпицбергена (?). Донные отложения пролива Кембридж представлены геохимически менее зрелым материалом, поступавшим в бассейн, по-видимому, в результате размыва комплексов пород, слагающих архипелаг Земля Франца-Иосифа. Рассмотрены изотопные характеристики (ϵNd , $^{207}Pb/^{206}Pb$ и $^{87}Sr/^{86}Sr$) 17 проб поверхностных донных осадков Баренцева моря. Показано, что основной вклад в формирование донных осадков центральных областей Баренцева моря вносят породы северо-европейской континентальной окраины, находящейся в зоне влияния Нордкапского (Атлантического) течения. Архипелаги и острова (Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и др.), обрамляющие Баренцево море, поставляют относительно небольшое количество обломочного материала, который переносится арктическими течениями. Значения ϵNd и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в донных осадках центральной части Баренцева моря заметно ниже, чем соответствующие характеристики инкорпорированного во льды осадочного материала, переносимого Трансполярным дрейфом. Это позволяет думать, что вклад такого материала в формирование поверхностных донных осадков Баренцева моря невелик.

Ключевые слова: Баренцево море, поверхностные донные осадки, редкие и рассеянные элементы, гранулометрический состав, геохимия, изотопный состав Nd, Pb и Sr.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(32)