

Особенности микроэлементного состава донных отложений озер полуостровов Рыбачий и Средний (Мурманская область, Арктика)

Адамская П. Н.^{1,2}, Слукровский З. И.¹, Даувальтер В. А.¹

¹ *Институт проблем промышленной экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН, Апатиты, polina.adamskaya@bk.ru*

² *Филиал ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», Апатиты*

Аннотация. Изучение микроэлементного состава донных отложений водоемов играет важную роль в лимнологических исследованиях территорий, особенно в контексте освоения природных ресурсов Арктики. В данной работе представлены результаты оценки микроэлементного состава современных донных отложений десяти малых озер, принадлежащих к разным геологическим свитам, полуостровов Рыбачий и Средний. Обнаружено, что осадки озер на полуострове Рыбачий, на водосборе которых залегают породы скорбеевской свиты обогащены U, Mo, Mn, P, редкоземельными элементами, тогда как для водоемов, приуроченных к породам перевальной свиты характерны обогащения Cs. Концентрации микроэлементов в донных отложениях озер п-ова Средний превышают кларк по Mn, Mo, Sb, U, на водосборе пород палвинской свиты, и Zn, Pb и Cd, на водосборе пород куяканской свиты. Также установлено, что в осадках озер, расположенных в пределах поропеллонской свиты выраженная геохимическая специализация отсутствует.

Ключевые слова: донные отложения, геохимия, микроэлементный состав, полуострова Рыбачий и Средний, Мурманская область, Арктика.

Features of the trace elements composition of lake sediments in the Rybachy and Sredny peninsulas (Murmansk region, Arctic)

Adamskaia P. N.^{1,2}, Slukovski Z. I.¹, Dauvalter V. A.¹

¹ *Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity, polina.adamskaya@bk.ru*

² *Apatity branch of Murmansk Arctic University, Apatity*

Abstract: The study of trace element composition in bottom sediments of water bodies plays an important role in limnological research, particularly in the context of Arctic natural resource development. This paper presents the results of an assessment of the trace element composition of modern bottom sediments of ten small lakes belonging to different geological formations, the Rybachy and Sredny peninsulas. It was found that lake sediments on the Rybachy Peninsula, in the catchment area of which the rocks of the Skorbeevskaya Formation are enriched with U, Mo, Mn, P, and rare earth elements, whereas lakes confined to rocks of the Perevalnaya Formation are characterized by Cs enrichment. The concentrations of trace elements in the bottom sediments of the lakes of the Sredny Peninsula exceed Clark in Mn, Mo, Sb, U, in the catchment area of the rocks of the Palvinskaya Formation, and Zn, Pb, and Cd, in the catchment area of the rocks of the Kuyakanskaya Formation. It has also been established that there is no pronounced geochemical specialization in the sediments of lakes located within the Poropellonskaya Formation.

Keywords: bottom sediments, geochemistry, trace element composition, Rybachy and Sredny peninsulas, Murmansk region, Arctic.

Введение

Донные отложения озер являются важным объектом ландшафтно-геохимических исследований, поскольку они способны хранить информацию о составе поступающего вещества, процессах осадконакопления и постседиментационных преобразованиях. Микроэлементный состав донных отложений формируется под воздействием комплекса факторов, включающих геологическое строение водосборной площади, гранулометрические особенности осадков, а также физико-химические условия среды. В результате озерные осадки выступают интегральным индикатором как природных, так и антропогенных процессов, происходящих в водных экосистемах.

Особенно актуальными данные исследования становятся в условиях Арктики, где прогрессирующее освоение природных ресурсов требует оценки фоновое геохимического состояния экосистем. В то же время значительная часть территорий Кольского региона остается слабо изученной,

особенно в отношении состава химических элементов донных отложений малых озер неурбанизированных территорий. Полуострова Рыбачий и Средний представляют собой уникальные природные полигоны, где на относительно небольшой территории сочетаются различные стратиграфические комплексы осадочных пород, отличающиеся по составу и условиям формирования. Несмотря на это, данные о микроэлементном составе донных отложений озер, приуроченных к данным территориям, остаются фрагментарными.

Цель данной работы – оценка химического состава современных донных отложений малых озер п-вов Рыбачий и Средний, а также выявление факторов, контролирующих их распределение. Дополнительно решается задача определения специфических ассоциаций элементов, характерных для отдельных стратиграфических подразделений.

Материалы и методы

Полуострова Рыбачий и Средний располагаются в северо-западной части Российской Федерации и административно входят в состав Печенгского муниципального округа Мурманской области. Морфологически территория представлена плато, резко обрывающимся к Баренцеву морю. Полуостров Средний соединяет полуостров Рыбачий с материковой частью Кольского полуострова через хребет Муста-Тунтури. В геологическом отношении рассматриваемая территория относится к позднепротерозойскому Тимано-Варангерскому складчато-разрывному поясу. Здесь осадки рифейского возраста выделяются в самостоятельный структурный блок. В пределах исследуемого района выделяются две структурно-формационные зоны: зона перикратонного прогибания, полуострову Средний, и зона интерпретируемая как пассивная континентальная окраина – полуостров Рыбачий. При этом геологическое строение п-ова Рыбачий сопровождается проявлением надвигов и аллахтонных структур, а также дискуссионным стратиграфическим положением осадочных толщ (Атлас..., 1971; Сорохтин и др., 2022).

На п-ове Рыбачий было изучено шесть малых озер (рис. 1), на водосборе которых залегают породы двух геологических свит. К скорбеевской свите относятся озера Скорбеевское, Крайнее и Лохи, перевальной – озера L1, L2, L3. Отложения скорбеевской свиты представлены сравнительно



Рис. 1. Район исследований – полуострова Рыбачий и Средний. Точками отмечены места отбора проб
Fig. 1. Study area–Rybachy and Sredny Peninsulas. Dots indicate sampling locations

однородной ассоциацией терригенных пород флишоидного типа, состоящих из аркозовых алевропесчаников, алевролитов и глинистых, и сульфидно-углеродистых сланцев. Перевальная свита сложена аркозовыми псаммитами (в том числе карбонатсодержащими), полимиктовыми гравелитами и алевролитами.

На п-ове Средний было изучено четыре малых озера, на водосборе которых залегают породы трех геологических свит: палвинской (оз. Палви), куяканской (оз. Питьевое) и поропеллонской (озера Попопеллон и Карху). Палвинская свита сложена кварцевыми и олигомиктовыми песчаниками, алевролитами и пелитами с прослоями карбонатных пород и линзами псефитов. Куяканская свита представлена преимущественно фосфоритсодержащими конгломератами и конгломератобрекчиями, ассоциирующими с аркозовыми песчаниками, алевролитами и пелитами. Поропеллонская свита характеризуется ритмичным чередованием флиша, представленным аркозовыми песчаниками, алевролитами и пелитами, с прослоями гравелитов и гравийных конгломератов.

Отбор проб донных отложений озер производился в летний период 2020–2024 гг. с помощью пробоотборника системы Скогхейма и дночерпателя Экмана-Берджа. Лабораторные исследования проводились на базе Института геологии КарНЦ РАН (Петрозаводск). Содержание микроэлементов определялось при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой на приборе XSeries-2 ICP-MS. Породообразующие элементы (оксиды Si, Ti, Al, P, Mn, Mg, Fe, K, Na, Ca) в донных отложениях определялись с применением рентген-флуоресцентного спектрометра ARL ADVANT'X (Thermo Fisher Scientific). Подробная методика подготовки проб к анализу и описание методов лабораторных исследований описано в работе Шелеховой и др., (2020). Для интерпретации распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) использовано нормирование на состав постархейского австралийского сланца (PAAS), применяющееся в качестве эталона для оценки поведения РЗЭ при геохимических исследованиях осадков и водных систем (Retif et al., 2023). Для графического представления данных были использованы программы MS Excel 2016 и Inkscape 0.91.

Результаты и обсуждение

Полуостров Рыбачий

Озера Крайнее, Лохи и Скорбеевское расположены на скорбеевской свите п-ова Рыбачий. В оз. Крайнее наблюдаются повышенные концентрации РЗЭ (491–610 мг/кг), превышающие кларк в 3 раза (Wedepohl, 1995). Спектры РЗЭ, нормированные на PAAS, характеризуются выраженным обогащением легкими РЗЭ ($(La/Yb) = 32$) относительно тяжелых и постепенным снижением нормированных значений от La до Lu (рис. 2). Подобная форма спектра является типичной для терригенного материала континентальной коры (Taylor, McLennan, 1985).

Во всех горизонтах наблюдается отрицательная Eu-аномалия ($Eu/Eu^* = 0.5$), где Eu^* – интерполированное значение Eu, определяемое по соседним РЗЭ на нормированном спектре. Данная аномалия отражает обеднение Eu, связанным с его преимущественным включением в плагиоклаз в про-

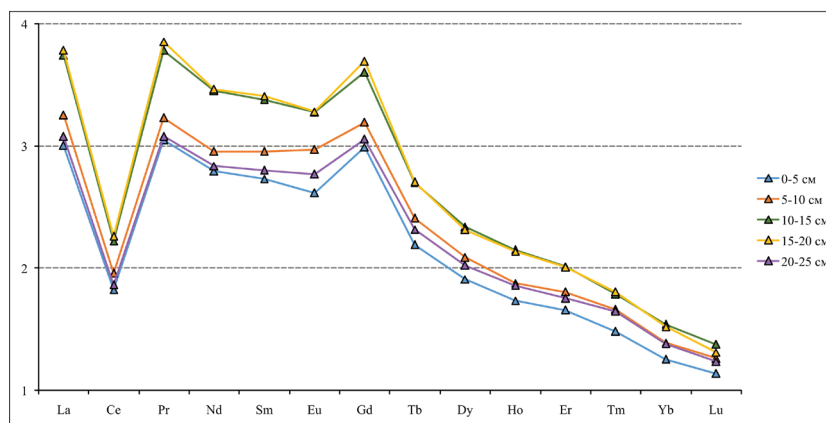


Рис. 2. PAAS–нормированные спектры РЗЭ отложений оз. Крайнее
Fig. 2. PAAS–normalized REE spectra of lake sediments of Lake Krainee

цессе магматической дифференциации. Поскольку такие особенности распределения РЗЭ характерны для коровых пород, это может указывать на литогенный источник вещества. Се-аномалия ($Se/Se^* = 0.2$), где Se^* — интерполированное значение Се, также определяемое по нормированному тренду соседних РЗЭ, проявляется в отклонении Се от линии тренда и может быть связана с окислительными условиями седиментации (Bauetal., 1996; Dubinin, 2004). Сходство спектров РЗЭ по всей колонке свидетельствует о стабильном литогенном вкладе в составе отложений пород, представленных глинистыми сланцами, песчаниками и алевролитами (Негруца, 1993).

В дночерпательной пробе отложений оз. Лохи фиксируются повышенные коэффициенты концентрации Р (3), Мо (4.3), Мп (4.6) и U (5.1), где коэффициент концентрации представляет собой отношение содержания элемента в образце к его кларку. Следовательно, их формирование связано с геохимическими условиями осадконакопления и раннего диагенеза. Низкое содержание органического вещества (ППП – 7 %), высокие концентрации $Fe_{\text{общ}}$ (10.4 %) и МпО (0.68 %) свидетельствуют о том, что основным механизмом накопления упомянутых выше элементов является сорбция на Fe-Мп оксидах в зоне редокс-барьера на границе «вода–осадок», где происходит восстановительная фиксация U и адсорбция Мо (Моисеенко и др., 1997; Юдович, Кетрис, 2011).

Обогащение U (4.6–5.5 мг/кг) отмечается также в оз. Скорбеевское, где концентрации данного элемента увеличиваются вниз по разрезу мощностью 35 см (7 валовых анализов с шагом 5 см), исключая антропогенную природу накопления. Увеличение концентраций U сопровождается ростом содержания Al_2O_3 , что указывает на связь урана с глинистым материалом водосбора ($R^2 = 0.6$). В работе Сорохтина и др. (2022) приводятся результаты аэрогамма-спектрометрической съемки по содержанию U в породах п-вов Рыбачий и Средний. Опираясь на эти данные, концентрации U в р-оне озер Лохи и Скорбеевское достигают $2.0\text{--}2.4 \cdot 10^{-4}$ %. Таким образом, следует вывод об обогащении донных отложений U в результате выветривания пород водосборной площади.

В озерах расположенных на перевальной свите п-ова Рыбачий, наблюдаются повышенные коэффициенты концентрации Cs – оз. L1 (1.8), L2 (4.6) и L3 (2.4). Такие значения объясняются наличием в породном комплексе свиты алевролитов, обогащенных Cs, которые встречаются в виде линз и прослоев неравномерно развитых на площади (Негруца и др., 1993).

Полуостров Средний

Донные отложения оз. Палви, расположенного на границе палвинской и пярярвинской свит, характеризуются повышенными содержаниями редокс-чувствительных элементов Мп (2992.5 мг/кг), Мо (3.6 мг/кг), Sb (1.0 мг/кг) и U (7.1 мг/кг). Вертикальное распределение элементов (рис. 3) отражает формирование в осадках трех геохимических зон, связанных с изменением редокс-условий и процессами ранней стадии диагенеза.

В верхней части разреза (0–17 см) Мп, U, Sb и Мо ведут себя относительно устойчиво, что характерно для субокисческих донных осадков, где Мп-оксиды сохраняются в твердой фазе и осуществляют сорбцию микроэлементы (Юдович, Кетрис, 2011). В интервале 19–28 см отмечается резкое увеличение концентраций Мп до экстремальных значений (62500 мг/кг), что указывает на формирование локального марганцевого горизонта. Подобное поведение элемента оценивается как результат раннедиагенетических процессов на границе окислительно-восстановительных условий, когда растворенный Mn^{2+} диффундирует вверх из восстановительных слоев и окисляется с образованием оксидов марганца (Даувальтер, Ильяшук, 2007). Гранулометрический состав осадков в этом интервале характеризуется как чистый алеврит (0.05–0.005 мм = 85 %), несмотря на то что основная масса осадка представлена песчаным алевритом (рис. 3). Высокая дисперсность осадочного материала способствует увеличению удельной поверхности и сорбционной емкости осадков.

В нижней части керна (27–33 см) отслеживается изменение поведения микроэлементов. Модификация выражается в значительном возрастании содержания Мо, достигая максимальных значений (до 15.8 мг/кг), U (до 7.8 мг/кг) и постепенном увеличении концентрации Sb (до 1.3 мг/кг). Данное распределение отражает миграцию элементов в поровых водах и их последующую фиксацию в более восстановительных условиях (McKeeetal., 1989). Таким образом, геохимические особенно-

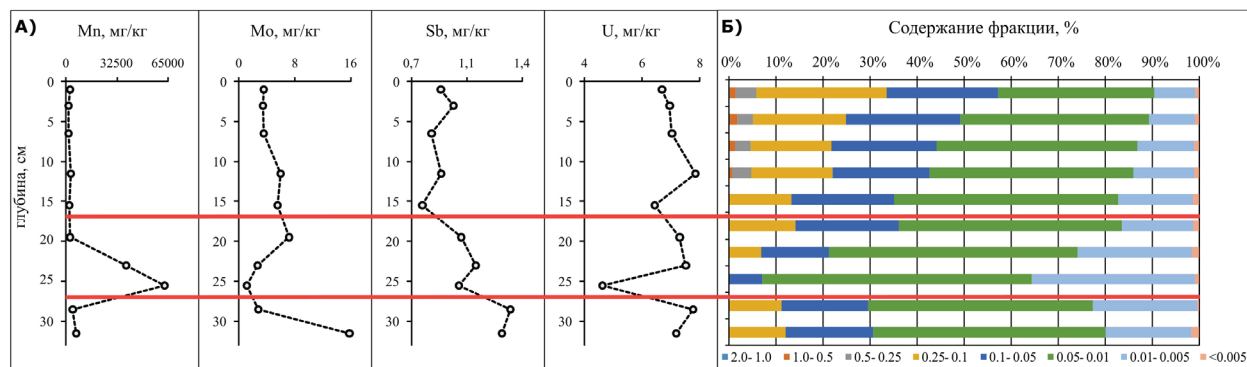


Рис. 3. А) Распределение содержаний микроэлементов в донных отложениях оз. Палви;
Б) Гранулометрический состав осадков оз. Палви

Fig. 3. A) Distribution of trace element contents in the bottom sediments of Lake Palvi;
B) Granulometric composition of bottom sediments of Lake Palvi

сти осадков оз. Палви отражают сочетание литогенного поступления тонкодисперсного терригенного материала и постседиментационные процессы начальной стадии диагенеза, контролирующие перераспределение элементов в толще отложений.

В оз. Питьевое, находящемся в пределах куюканской свиты п-ова Средний, обнаружены аномальные коэффициенты концентраций Zn (7.7), Pb (14.4) и Cd (167.3). Такая ассоциация элементов, как правило, говорит о полиметаллическом техногенном загрязнении. Важно отметить, что по поведению Cu и Ni, выступающих в роли классических индикаторов техногенного загрязнения (Даувальтер и др., 2015), антропогенный сигнал отмечается только в верхней части разреза (от 10 см) (рис. 4). По этому горизонту можно маркировать начало влияния отходов промышленных центров Мурманской области и стран Северной Европы, в том числе Кольской горно-металлургической компании, добывающей медно-никелевые руды в поселке Никель (Печенгский р-н), на водоем. Аналогичное поведение распределения Ni и Cu фиксируется во всех колонках отложений исследуемых озер.

Несмотря на наличие загрязнения в верхней части разреза, повышенные концентрации Zn, Cd и Pb фиксируются по всей колонке, что свидетельствует о первостепенном вкладе природных факторов. Корреляция Cd и Zn ($R^2 = 0.7$), Pb и Zn ($R^2 = 0.5$), указывают на их общий источник поступления и сходство поведения в процессе осадконакопления. Так, в слоях с наибольшим содержанием Zn были обнаружены частицы сфалерита (ZnS), содержащие Pb, Cd и Fe (Slukovskii et al., 2024). Однако столь высокие содержания Cd не могут быть объяснены исключительно вкладом свинцово-цинковой минерализации. Корреляционный анализ выявил практически функциональную зависимость между Cd и P_2O_5 ($R^2 = 1.0$), что может указывать на влияние фосфатоносных псевцитов и фосфоритовых конкреций (Батурин, Орешкин, 1981; Негруца и др., 1993), которыми сложена куюканская свита.

В озерах поропеллонской свиты п-ова Средний, к которым относятся оз. Карху и Поропеллон, значимых превышений над кларками микроэлементов не выявлено, что свидетельствует об отсутствии выраженной геохимической специализации донных отложений озер в пределах данной свиты.

Заключение

На п-ове Рыбачий выделяются несколько геохимических типов осадков. Озера принадлежащие к водосбору пород скорбеевской свиты, демонстрируют вариативную специфику накопления элементов в зависимости от пространственного расположения. Так, оз. Крайнее, расположенное в прибрежной зоне полуострова, характеризуется обогащением РЗЭ (до 610.0 мг/кг), связанным с литогенным вкладом РЗЭ – обогащенных пород. Наряду с этим озера Лохи и Скорбеевское, расположенные в 2.5 км друг от друга, формируют единую геохимическую ассоциацию с повышенными концентрациями U (до 8.7 мг/кг), кроме того для оз. Лохи также установлены аномалии P (до 2233.7 мг/кг), Mo (до 4.8 мг/кг) и Mn (до 3278.8 мг/кг), что указывает на роль редокс-условий и раннедиагенетических преобразований. В пределах перевальной свиты п-ова Рыбачий (оз. L1, L2, L3) выявлены

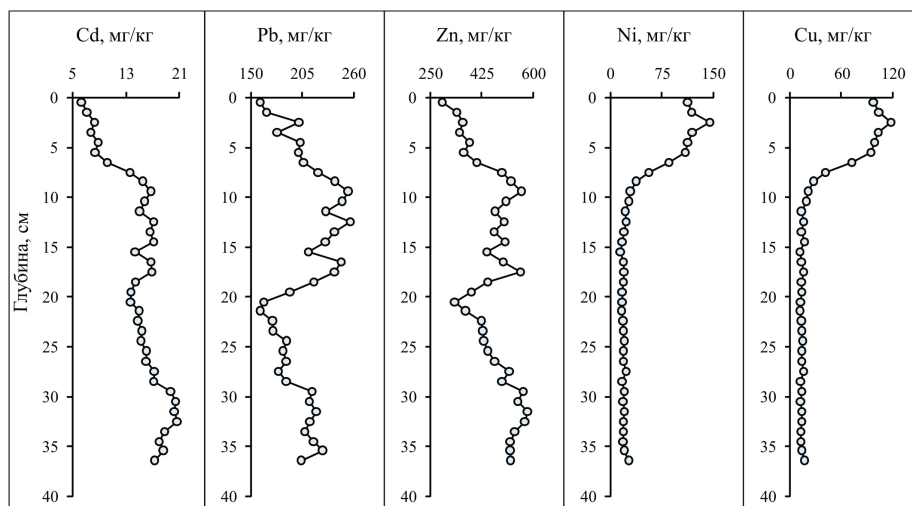


Рис. 4. Распределение содержаний микроэлементов в донных отложениях оз. Питьевое
Fig. 4. Distribution of trace element contents in the bottom sediments of Lake Pitevoe

устойчивые аномалии Cs (до 16.9 мг/кг), отражающие особенности минерального состава терригенного материала, поступающего в водоем.

Для п-ова Средний также установлена отчетливая связь между геологическим строением и микроэлементным составом осадков. В оз. Палви, расположенном в зоне контакта палвинской и пряярвинской свит, отмечены повышенные концентрации Mo (до 15.8 мг/кг), U (до 7.7 мг/кг), Mn (до 62549.2 мг/кг) и Sb (до 1.3 мг/кг), формирование которых связано с сочетанием литогенного поступления микроэлементов и раннего диагенеза осадков. В оз. Питьевое, приуроченном к кужанской свите, зафиксированы аномалии Zn (до 562.9 мг/кг), Pb (до 247.2 мг/кг) и Cd (18.7 мг/кг). Установлено, что в результате процессов выветривания и разрушения фосфатоносных пород водосбора, а также породосодержащих сфалерит, происходит вынос элементов и дальнейшая аккумуляция в донных отложениях. В отличие от указанных объектов, в озерах поропеллонской свиты (Поропеллон и Карху) микроэлементное обогащение не выражено, что позволяет использовать данные озера в качестве условно «фоновых» при сравнительном анализе распределения химических элементов в донных отложениях озер п-ова Средний.

Таким образом, формирование микроэлементного состава донных отложений озер исследуемых территорий определяется комплексным взаимодействием литогенного фактора, особенностей седиментации и раннедиагенетических процессов. Полученные результаты подчеркивают ведущую роль геологического строения водосборных площадей в контроле распределения микроэлементов в донных отложениях и могут быть использованы при дальнейших исследованиях, включая оценку природного фона и выявление аномалий в условиях арктических регионов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность М. А. Шестакову за создание картографического материала.

Работа производилась при поддержке и в рамках реализации проекта РНФ24–17–20006 «Фоновые озера Арктической зоны Мурманской области: гидрохимия, аномалии тяжелых металлов и микропластик как новый тип загрязнения водоемов мира».

Литература

1. Атлас Мурманской области / А. Ф. Антонов [и др.]. М.: Главное Управление Геодезии и Картографии при Совете Министров СССР, 1971. 33 с.
2. Батурин Г. Н., Орешкин В. Н. Кадмий в процессе современного океанского фосфоритообразования // Геохимия. 1981. № 11. С. 1727–1733.

3. Даувальтер В. А., Кашулин Н. А., Денисов Д. Б. Тенденции изменения содержания тяжелых металлов в донных отложениях озер Севера Фенноскандии в последние столетия // Труды КарНЦ РАН. 2015. № 9. С. 62–75. <https://doi.org/10.17076/lim40>.
4. Даувальтер В. А., Ильяшук Б. П. Условия образования железо-марганцевых конкреций в донных отложениях озер в пределах Балтийского кристаллического щита // Геохимия. 2007. № 6. С. 680–684.
5. Моисеенко Т. И., Даувальтер Т. И., Родюшкин Т. И. Геохимическая миграция элементов в субарктическом озере (на примере озера Имандра). Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 1997. 127 с.
6. Негруца В. З., Басалаев А. А., Чикирев И. В. Баренцевоморский фосфоритовый бассейн. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН, 1993. 119 с.
7. Сорохтин Н. О., Козлов Н. Е., Глазнев В. Н., Куликов Н. В., Чикирев И. В., Мартынов Е. В., Марчук Т. С. Архей и неопротерозой полуостровов Рыбачий и Средний (Балтийский щит): геология, геодинамика, нефтегазоносность и алмазоносность. Апатиты. Изд-во: КНЦ РАН. 2022. 853 с. <https://doi.org/10.37614/978.591137.469.3>.
8. Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии. Петрозаводск. Изд-во: Карельский научный центр РАН. 2020. 111 с.
9. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар. Изд-во: Геопринт, 2011. 742 с.
10. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Новое в геохимии литогенеза // Уральский геологический журнал. 2011. № 3. Сыктывкар. Изд-во: Иванов Олег Константинович. С. 47–95.
11. Bau M., Koschinsky A., Dulski P., Hein J. R. Comparison of the partitioning behaviours of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1996. V. 60. P. 1709–1725. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00063-4).
12. Dubinin A. V. Geochemistry of Rare Earth Elements in the Ocean // *Lithology and Mineral Resources*. 2004. V. 39. P. 289–307. <https://doi.org/10.1023/B:LIMI.0000033816.14825.a2>.
13. Loring D. H. Lithium – a new approach for the granulometric normalization of trace metal data // *Marine Chemistry*. 1990. V. 29. P. 155–168. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(90\)90011-Z](https://doi.org/10.1016/0304-4203(90)90011-Z).
14. Mao L., Duowen M., Jinghong Y., Yuanyuan G., Haiyan L. Rare Earth Elements Geochemistry in Surface Floodplain Sediments from the Xiangjiang River, Middle Reach of Changjiang River, China // *Quaternary International*. 2014. V. 336. P. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.01.052>.
15. McKee J. D., Wilson T. P., Long D. T., Owen R. M. Pore water profiles and early diagenesis of Mn, Cu, and Pb in sediments from large lakes // *Journal of Great Lakes Research*. 1989. V. 15. P. 68–83. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(89\)71463-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(89)71463-5).
16. Retif J., Zalouk-Vergnoux A., Nicolas Briant N., Poirier L. From geochemistry to ecotoxicology of rare earth elements in aquatic environments: Diversity and uses of normalization reference materials and anomaly calculation methods // *Science of The Total Environment*. 2023. V. 856. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158890>.
17. Slukovskii Z., Guzeva A., Malysheva M., Kudryavtseva L. Pristine Tundra Lakes in the North of Murmansk Region (Arctic): Geochemistry of Sediments, Pollution Assessment and Heavy Metal Forms // *International Journal of Environmental Research*. 2024. V. 18. <https://doi.org/10.1007/s41742-024-00612-7>.
18. Taylor S. R., McLennan S. M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985. 312 p.
19. Wedepohl K. H. The Composition of the Continental Crust // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1995. V. 59. P. 1217–1232. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2).