

## Редкоземельные элементы в отложениях озер Республики Карелии: природные и антропогенные факторы образования геохимических аномалий

Слуковский З. И. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Институт геологии Карельского НЦ РАН, Петрозаводск, slukovsky87@gmail.com*

<sup>2</sup> *Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского НЦ РАН, Апатиты*

**Аннотация.** В работе приводится обобщение многолетних работ по изучению современных отложений озер Республики Карелии с акцентом на анализ содержания в пресноводных осадках редкоземельных элементов. Показано, что суммарные концентрации редкоземельных элементов в отложениях озер Карелии варьируют от 16.3 до 1916.1 мг/кг при медианном фоновом значении – 77.2 мг/кг. Существенный разброс данных связан с наличием в выборке аномальных концентраций редкоземельных элементов в донных отложениях по отношению к среднему составу земной коры и фону. В первую очередь, обнаруженные аномалии связаны с влиянием горных пород водосбора на формирование микроэлементного состава отложений. Такие закономерности выявлены в осадках озер Апрельское и Перманто, расположенных на севере региона, и в гранитном массиве рядом с водоемами. Показано, что общее содержание редкоземельных элементов в обозначенных магматических породах варьирует от 256 до 500 мг/кг, что в 1.4–2.7 раза выше кларка, а также выше средних значений концентраций редкоземельных элементов в породах Центрально-Карельского геологического домена. Кроме того, на основе соотношения легких и тяжелых редкоземельных элементов проведена типизация изученных отложений. Показано, что аномальные концентрации редкоземельных элементов также могут быть связаны с антропогенным влиянием, в частности с воздействием городской среды на отложения малых озер. Анализ показал, что в результате влияния промышленности и транспорта на водные объекты городской среды растет не только общее содержание редкоземельных элементов, но и увеличивается доля тяжелых редкоземельных элементов по отношению к легким, что ранее уже отмечалось при изучении урбанизированных районов другого региона страны.

**Ключевые слова:** геохимия донных отложений, редкоземельные элементы, геохимическая типизация, Республика Карелия, Арктическая зона РФ.

## Rare Earth elements in the sediments of lakes of the Republic of Karelia: natural and anthropogenic factors of geochemical anomalies forming

Slukovski Z. I. <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of geology of Karelian research center of RAS, Petrozavodsk, slukovsky87@gmail.com*

<sup>2</sup> *Institute of North Industrial Ecology Problems Kola SC RAS, Apatity*

**Abstract.** This paper summarizes long-term studies of modern lake sediments in the Republic of Karelia, focusing on the analysis of rare earth element content in freshwater sediments. Total rare earth element concentrations in Karelian lake sediments range from 16.3 to 1916.1 mg/kg, with a median background value of 77.2 mg/kg. The significant data scatter is due to the presence of anomalous rare earth element concentrations in sediments relative to the average crustal composition (clarke) and background. These anomalies are primarily related to the influence of catchment rocks on the formation of the trace element composition of sediments. Similar patterns were observed in the sediments of lakes Aprelskoe and Permanto, located in the north of the region, and in the granite massif adjacent to these lakes. It was shown that the total rare earth element content in the studied igneous rocks ranges from 256 to 500 mg/kg, which is 1.4–2.7 times higher than the clarke value and also higher than the average rare earth element concentrations in rocks of the Central Karelian geological domain. Furthermore, a classification of the studied sediments was conducted based on the ratio of light to heavy rare earth elements. It was shown that anomalous rare earth element concentrations may also be related to anthropogenic influence, particularly the impact of the urban environment on small lake sediments. Analysis revealed that the impact of industry and transport on urban water bodies not only increases the total rare earth element content but also the proportion of heavy rare earth elements relative to light rare earth elements, a phenomenon previously observed in studies of urbanized areas in another region of the country.

**Keywords:** geochemistry of sediments, rare earth elements, geochemical typing, Republic of Karelia, Arctic zone of the Russian Federation.

## Введение

Концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ), включающие Sc, Y и лантаноиды от La до Lu, широко используются в науках о Земле для индикации различных геологических и экологических процессов. К числу объектов, где исследуются концентрации РЗЭ, относятся донные отложения водных объектов, включая озера (Olmez et al., 1991; Soroaga et al., 2022; Wang et al., 2024). В последние годы РЗЭ активно используются в качестве маркера антропогенного влияния на пресноводные отложения, особенно отложения озер Севера России (Khan et al., 2016; Slukovskii et al., 2022; Dauvalter et al., 2022; Krasavtseva et al., 2025).

Эколого-геохимические исследования современных донных отложений озер на территории Республики Карелии в основном касались анализа поведения и накопления тяжелых металлов, чьи повышенные концентрации в осадках являются следствием влияния промышленных предприятий и транспорта на водные экосистемы (Белкина и др., 2016; Слуковский, 2018; Белкина, Кулик, 2020; Слуковский, Даувальтер, 2020). Поведение литофильных элементов, к которым можно отнести РЗЭ, изучено недостаточно. Таким образом, цель данной работы – оценить уровень накопления РЗЭ в современных отложениях озер на территории Республики Карелии для выявления ключевых факторов (природных и антропогенных), влияющих на образование геохимических аномалий РЗЭ в пресноводных осадках региона.

## Методы исследования

В основу работы положены материалы, полученные при личном участии автора в процессе проведения научно-исследовательских работ на территории разных районов Республики Карелии в период с 2014 по 2020 гг. Всего было исследовано более 30 водоемов, включая озера урбанизированных территорий, расположенные в зонах влияния городов Петрозаводск, Медвежьегорск, Суоярви, Сортавала и Сегежа (рис. 1). Кроме того, были проведены исследования Выгозера или Выгозерского водохранилища, где пробы отбирались в северной, центральной и южной частях водного объекта.



Рис. 1. Карта района исследования с указанием изученных водных объектов (автор М. А. Шестаков)

Fig. 1. Map of the study area indicating the studied water bodies (author M. A. Shestakov)

Отбор проб донных отложений проводился в летнее (с открытой воды) и зимнее время (со льда) при помощи пробоотборника Limnos (производство Финляндия). Прибор позволяет получать стратифицированные ненарушенные колонки отложений, которые можно разделять на слои от 1 см в зависимости от вида дальнейших работ. Чаще всего колонки делились на слои 1–2 см.

После отбора пробы складывались в пластиковые zip-пакеты и доставлялись в лабораторию. Для оценки химического состава отложений пробы высушивались при температуре 105 °С, измельчались на истирателе до состояния порошка и затем разлагались смесью кислот. Содержание микроэлементов, включая концентрации РЗЭ, определялось при помощи масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой на приборе XSeries-2 ICP-MS. Подробное описание использованных методов представлено в этом издании «Методы исследования донных отложений озер Карелии» (Шелехова и др., 2020).

### Результаты и обсуждение

Исследования показали, что суммарные концентрации РЗЭ в отложениях озер Карелии варьируют от 16.3 до 1916.1 мг/кг при медианном фоновом значении – 77.2 мг/кг (Slukovskii, 2020). По указанным данным виден большой разброс значений (коэффициент вариации – 168 %) концентраций РЗЭ в исследованных осадках озер. Разброс значений также характерен для суммарных концентраций РЗЭ в сапропелевых отложениях озер Сибири – от 8 до 162 мг/кг (Страховенко, Овдина, 2021), что близко к медианному значению РЗЭ в отложениях озер Карелии. Однако следует заметить, что разброс значений концентраций РЗЭ в озерах двух регионов существенно отличается. Во многом это связано с аномально высокими концентрациями РЗЭ в донных отложениях озер Апрельское и Перманто, расположенных в Лоухском районе, то есть на севере Республики Карелии (Slukovskii et al., 2025). На графиках нормированных по хондриту концентраций РЗЭ в разных озерах Карелии отчетливо видны существенные превышения концентраций, как легких, так и тяжелых РЗЭ в отложениях озер Апрельское и Перманто над кларком земной коры (рис. 2).

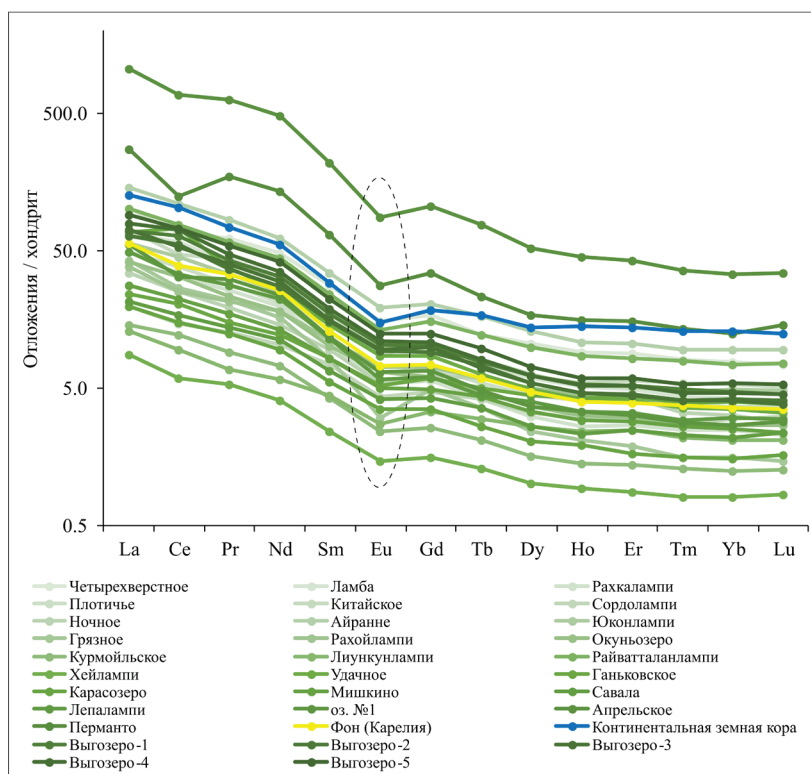


Рис. 2. Логарифмированные тренды нормализованных по хондриту (Sun, McDonough, 1989) усредненных содержаний лантаноидов в водоемах Карелии по сравнению с континентальной корой

Fig. 2. Logarithmic trends of chondrite-normalized (Sun, McDonough, 1989) average lanthanide contents in Karelian water bodies compared to the continental crust

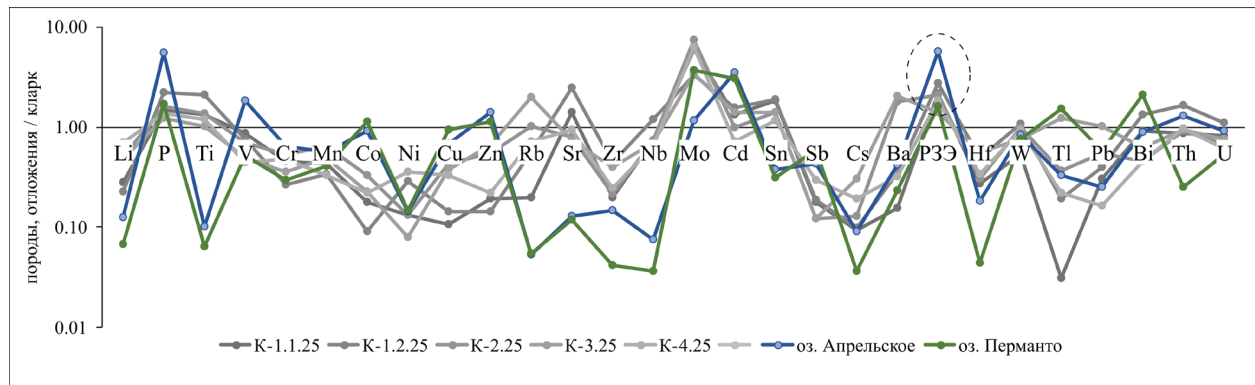


Рис. 3. Нормализация концентраций элементов в породах (гранитах) и отложениях озер Апрельское и Перманто, расположенных на севере Карелии по среднему составу континентальной коры (Wedepohl, 1995). Все значения представлены в логарифмической шкале

Fig. 3. Normalization of element concentrations in rocks (granites) and sediments of the Aprelskoye and Permanto lakes, located in northern Karelia, according to the average composition of the continental crust (Wedepohl, 1995). All values are presented on a logarithmic scale

Кроме указанных водоемов, превышающие кларк концентрации РЗЭ отмечаются в озерах Четырехверстное (до 274.6 мг/кг), Ламба (до 251.3 мг/кг) и Айранне (до 224.4 мг/кг). На графиках также видно, что усредненные концентрации РЗЭ в изученных донных отложениях озер Карелии имеют схожие тренды распределения с содержанием РЗЭ в верхней части земной коры. Почти на всех спайдерграммах установлена отрицательная аномалия  $Eu - Eu^A$ , которая характерна для современных осадочных геологических образований (Sojka et al., 2019). Средние значения  $Eu^A$  для исследованных отложений варьируют от 0.47 до 0.80, что близко к средней величине  $Eu^A$  для осадочных пород фанерозоя (0.61–0.72) и постархейских осадочных пород Австралии (0.65), которые традиционно используют для сравнения с мировой литературе (Юдович, Кетрис, 2011).

Известно, что состав горных пород напрямую определяет состав отложений водных объектов, расположенных в зоне их распространения. Эколого-геологические исследования показали, что аномально высокие концентрации РЗЭ в отложениях озер Апрельское и Перманто связаны с аналогичным уровнем накопления РЗЭ в гранитах, выходящих на дневную поверхность вблизи изучаемых водоемов. На графике видно, что пики концентраций РЗЭ в породах и отложениях озер идентичны (рис. 3). Общее содержание РЗЭ в обозначенных магматических породах варьирует от 256 до 500 мг/кг, что в 1.4–2.7 раза выше кларка, а также выше средних значений концентраций РЗЭ в гранитоидах Центральном-Карельского геологического домена, где их содержание равно 121.1 мг/кг (Чекулаев и др., 2022). Кроме РЗЭ, в отложениях озер Апрельское и Перманто и гранитоидах вблизи них выделяется общность накопления Li, P, Cr, Mn, Mo, Cs, Zr, Hf, Bi и U, что дополнительно подчеркивает тесную геохимическую связь в системе «порода-вода-отложения озер». Ранее схожее явление отмечалось автором при изучении озер Антарктики, где в замкнутой геологической системе полуострова Файлдс местные вулканические породы полностью определяют микроэлементный состав современных донных отложений малых озер, даже несмотря на некоторое антропогенное влияние со стороны полярных станций и дальнего переноса загрязнителей (Слуковский, Гузева, 2024).

Несмотря на то, что озера Апрельское и Перманто – это озера фоновых территорий, где антропогенное влияние отмечается только за счет выбросов от предприятий, расположенных в сотнях километрах от водоемов (Slukovskii et al., 2025), на других фоновых территориях Карелии таких высоких концентраций РЗЭ не наблюдается. Это видно, как по графику на рис. 2, так и на графике соотношения  $La+Ce$  и  $Yb+Lu$  (рис. 4). Данное соотношение, где используются концентрации двух крайних элементов в ряду легких и тяжелых РЗЭ, позволяет, кроме того, провести геохимическую типизацию исследованных донных отложений озер республики. Исключая пробы озер Апрельское и Перманто из-за их экстремальных концентраций РЗЭ в осадках, по графику видно, что повы-

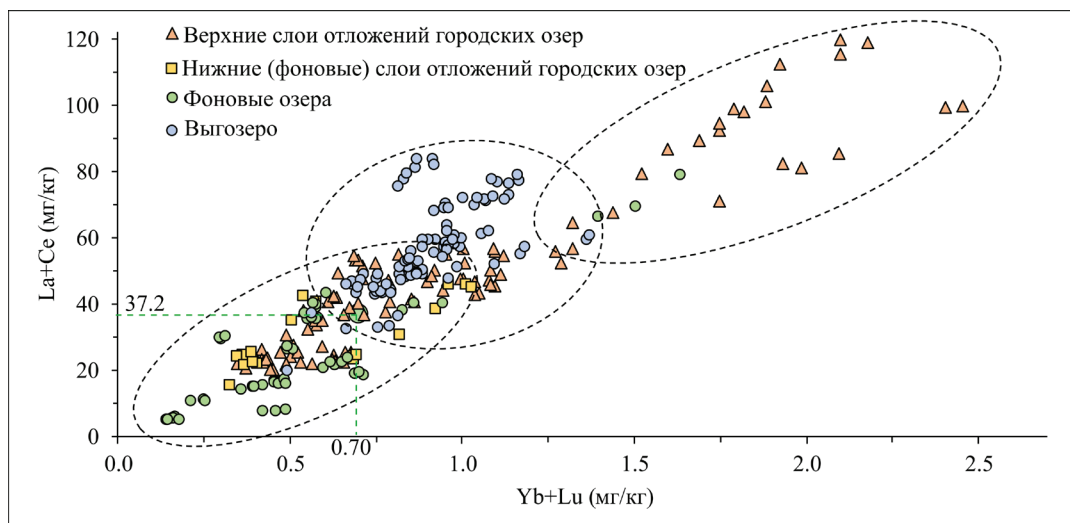


Рис. 4. Геохимическая типизация отложений озер Республики Карелии по соотношению La+Ce и Yb+Lu  
Fig. 4. Geochemical typification of lake sediments in the Republic of Karelia based on the La+Ce and Yb+Lu ratio

шенными значениями РЗЭ также характеризуются верхние слои отложений городских озер региона, где ранее фиксировались самые высокие концентрации тяжелых металлов (Слуковский, 2020). Известно, что антропогенное влияние на урбанизированных территориях и в промышленных районах часто играет роль в повышенном уровне накопления РЗЭ вместе с «классическими» загрязнителями в отложениях озер и рек (Khan et al., 2016; Slukovskii et al., 2022; Dauvalter et al., 2022). Самые минимальные концентрации РЗЭ отмечаются преимущественно в озерах фоновых районов (кроме Апрельского и Перманто), а также в фоновых (нижних) слоях отложений озер городских районов, так как они были сформированы до начала интенсивного антропогенного влияния на окружающую среду региона. В эту же группу входят и отложения верхних слоев городских озер, где загрязнение по характеру накопления тяжелых металлов было минимальным. Например, к числу таких водоемов относятся озера небольшого города Суоярви (Слуковский, 2025).

Отдельно по графику соотношения La+Ce и Yb+Lu выделяются отложения Выгозерского водохранилища, где общие концентрации РЗЭ находятся в промежуточном положении между сильно загрязненными осадками городских озер и отложениями с минимальным уровнем загрязнения. Такая ситуация связана с тем, что изученные отложения Выгозера полностью или частично сформировались после трансформации озера в водохранилище в середине 20 века (Потахин и др., 2018). В результате изначально фоновые слои осадков были переотложены и смешаны с большой массой нового материала, поступившего в озеро в результате размыва почв и пород водосборного бассейна. При этом, незначительное число мощных антропогенных источников вблизи Выгозера не позволяет достигнуть ему уровня накопления РЗЭ и других элементов (Slukovskii et al., 2021), как это происходит в малых городских озерах Карелии.

Важно отметить, что в озерах урбанизированных территорий общее содержание РЗЭ в вертикальном срезе увеличивается от нижних (фоновых) слоев к верхним (более загрязненным), что ранее отмечалось уже при исследовании отложений озер городов Мурманской области (Slukovskii et al., 2022). Другая тенденция связана с повышением доли тяжелых РЗЭ по сравнению с легкими также от нижних слоев к верхним в отложениях изученных городских озер (рис. 5). Исследование снеговых выпадений в урбанизированных районах Западной Сибири показывает, что антропогенные выбросы влияют на обогащение природных сред вблизи городов и промышленных предприятий тяжелыми РЗЭ (Языков, 2006). С другой стороны, при исследовании колонок современных отложений озер фоновых территорий Республики Карелии значения соотношения La+Ce/Yb+Lu либо не имеет никакой динамики, либо наблюдается увеличение доли легких РЗЭ по сравнению с тяжелыми, что в значительной степени связано с эоловым переносом (Страховенко, Овдина, 2021).

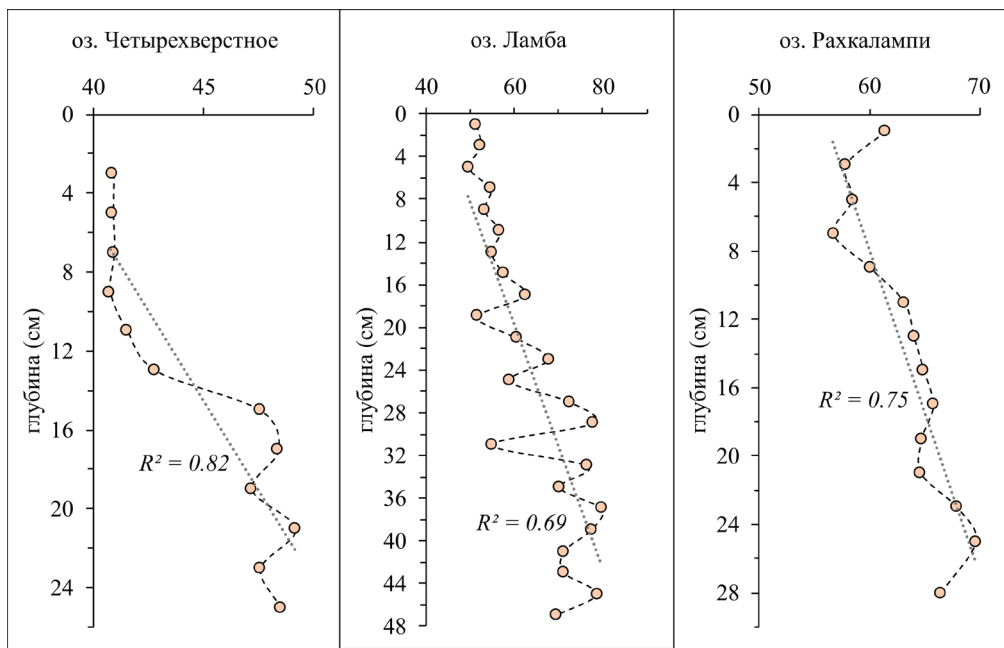


Рис. 5. Вертикальное распределение значений индекса-соотношения La+Ce/Yb+Lu в колонках современных отложений городских озер Карелии (Четырехверстное и Ламба – озера г. Петрозаводска, Рахкалампя – озеро в г. Суоярви)

Fig. 5. Vertical distribution of the La+Ce/Yb+Lu ratio index values in the columns of modern sediments of urban lakes in Karelia (Chetyrekhverstnoe and Lamba – lakes in Petrozavodsk, Rakhkalampi – lake in Suoyarvi)

### Заклучение

В результате обширного исследования уровней накопления РЗЭ в современных отложениях озер на территории Республики Карелии были выявлены аномальные концентрации РЗЭ в осадках, связанные с природными факторами. Основной из них – это геологический, которые хорошо проявляется на поведении РЗЭ в озерах Апрельское и Перманто на севере региона, где аномальные концентрации РЗЭ в отложениях связаны с аналогичными содержаниями их в местных гранитных породах. Также было установлено, что наряду с природным антропогенный фактор также может влиять на изменение фона РЗЭ в озерах урбанизированных территорий, что хорошо видно по повышенным концентрациям РЗЭ в самых верхних (наиболее загрязненных) слоях отложений изученных озер. Анализ соотношения легких и тяжелых РЗЭ по индексу La+Ce/Yb+Lu позволил типизировать изученные отложения и их озера на группы. Минимальный уровень РЗЭ отмечается в озерах фоновых районов и осадках городских озер, подверженных незначительному загрязнению; средний установлен в отложениях Выгозерского водохранилища, где отложения из фоновых стали условно-фоновыми в результате кардинального изменения в режиме водоема в середине 20 века; высокий – в озерах городских районов и озерах Апрельское и Перманто, являющимися исключением в ряду других водоемов фоновых территорий.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии Карельского научного центра РАН № FMEN-2023-0008 и государственного задания Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН № FMEN-2024-0014.

### Литература

1. Белкина Н. А., Кулик Н. В. Современные донные отложения петрозаводской губы онежского озера // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. 2020. № 1. С. 11.
2. Белкина Н. А., Субетто Д. А., Ефременко Н. А., Кулик Н. В. Особенности распределения микроэлементов в поверхностном слое донных отложений Онежского озера // Наука и образование. 2016. № 3(83). С. 135–139.

3. Потахин М. С., Белкина Н. А., Слуковский З. И., Новицкий Д. Г., Морозова И. В. Изменение донных отложений Выгозера в результате многофакторного антропогенного воздействия // *Общество. Среда. Развитие*. 2018. № 3 (48). С. 107–117.
4. Слуковский З. И. Микроэлементный состав донных отложений малых озер как индикатор возникновения экологических рисков в условиях урбанизированной среды Республики Карелии // *Водное хозяйство России*. 2018. № 6. С. 70–82.
5. Слуковский З. И. Эколого-геохимические особенности современных отложений озера Рахкалампи (город Суоярви, Карелия) // *Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2025. № 22. С. 187–193. <https://doi.org/10.31241/FNS.2025.22.025>.
6. Слуковский З. И., Гузева А. В. Редкие элементы в колонках современных отложений озер острова Кинг-Джордж, Антарктика // *Доклады РАН. Науки о Земле*. 2024. Т. 516, № 1. С. 391–400.
7. Слуковский З. И., Даувальтер В. А. Особенности накопления свинца, сурьмы и кадмия в отложениях малых озер юга Карелии // *Тр. Карельского НЦ РАН*. 2020. № 4. С. 75–94.
8. Страховенко В. Д., Овдина Е. А. Особенности распределения редкоземельных элементов в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021. Т. 332, № 10. С. 171–179.
9. Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Егорова Ю. С. Архейская тоналит-грандьемит-гранодиоритовая ассоциация Карельской провинции: геология, геохимия, этапы и условия образования // *Стратиграфия. Геологическая корреляция*. 2022. № 30 (4). С. 3–21.
10. Шелехова Т. С., Слуковский З. И., Лаврова Н. Б. Методы исследования донных отложений озер Карелии Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2020. 111 с.
11. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар. Изд-во: Геопринт, 2011. 742 с.
12. Язиков Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: автореф. дис.... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.36. Томск, 2006.
13. Dauvalter V., Slukovskii Z., Denisov D., Guzeva A. A Paleolimnological Perspective on Arctic Mountain Lake Pollution // *Water*. 2022. V. 14 (4044) <https://doi.org/10.3390/w14244044>.
14. Khan A. M., Yusoff I., Bakar N. K. A. et al. Assessing anthropogenic levels, speciation, and potential mobility of rare earth elements (REEs) in ex-tin mining area // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. V. 23. P. 25039–25055.
15. Krasavtseva E., Sandimirov S., Elizarova I., Malysheva M., Makarov D., Kaganovich N. Rare Earth Elements in Bottom Sediments of the Northern Part of Lake Umbozero, Murmansk Region, Russia // *Minerals*. 2025. Vol. 15 (973). <https://doi.org/10.3390/min15090973>
16. Olmez I., Sholkovitz E.R., Hermann D., Enganhouse R.P. Rare Earth Elements in Sediments off Southern California: A New Anthropogenic Indicator // *Environmental Science & Technology*. 1991. V. 25. P. 310–316.
17. Slukovskii Z., Dauvalter V., Shelekhova T. Anomalies of rare earth elements and heavy metals/metalloids in modern sediments of small lakes in the north of Karelia (Arctic): geology and technogenesis influence // *Environmental Earth Sciences*. 2025. V. 84(68).
18. Slukovskii Z., Medvedev M., Mitsukov A., Dauvalter V., Grigoriev V., Kudryavtzeva L., Elizarova I. Recent Sediments of Arctic Small Lakes (Russia): Geochemistry Features and Age // *Environment Earth Science*. 2021. V. 80(302).
19. Slukovskii Z. I. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia // *Вестник МГТУ*. 2020. № 23(1). 80–92.
20. Slukovskii Z. I., Guzeva A. V., Dauvalter V. A. Rare earth elements in surface lake sediments of Russian arctic: Natural and potential anthropogenic impact to their accumulation // *Applied Geochemistry*. 2022. V. 142 (105325). <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105325>.
21. Sojka M., Siepak M., Pietrewicz K. Concentration of Rare Earth Elements in Surface Water and Bottom Sediments in Lake Wadag, Poland // *Journal of Elementology*. 2019. V. 24(1). P. 125–140.
22. Soroaga L. V., Amarandei C., Negru A. G., Olariu R. I., Arsene C. Assessment of the Anthropogenic Impact and Distribution of Potentially Toxic and Rare Earth Elements in Lake Sediments from North-Eastern Romania // *Toxics*. 2022. V. 10(5). 242 p.
23. Wang S., Wang Z., Gao S., Zhang X., Zeng J., Wu Q. Rare earth elements in lake sediments record historic environmental influences from anthropogenic activities // *Ecological Indicators*. 2024. V. 159. 111680 p.