

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-6-96-101

## СОДЕРЖАНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ РЕК И ОЗЕР УМЕРЕННОЙ И БОРЕАЛЬНОЙ ЗОН

Ольга Юрьевна Дроздова<sup>1</sup>✉, Алиса Романовна Алешина<sup>2</sup>,  
Сергей Анатольевич Лапицкий<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; drozdova@geol.msu.ru✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alisa.aleshina@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lapitsky@geol.msu.ru

**Аннотация.** Изучались геохимические характеристики и нормализованные спектры редкоземельных элементов (РЗЭ) в 16 образцах вод, отобранных из рек и озер в умеренных и бореальных регионах России. Показано, что исследуемые воды характеризуются типичными для поверхностных вод спектрами РЗЭ, при этом содержания легких РЗЭ выше, чем тяжелых. Умеренные или высокие положительные корреляции наблюдались между концентрациями РЗЭ, растворенного органического углерода и железа в водах озер, что указывает на потенциальную роль органо-минеральных коллоидов в переносе РЗЭ. В некоторых изученных водоемах отмечены аномалии церия (из-за его окисления на поверхности оксигидроксидов Mn и Fe) и европия, что связано с вкладом подземных вод в питание изучаемых рек и озер.

**Ключевые слова:** редкоземельные элементы, реки, озера, бореальная зона

**Для цитирования:** Дроздова О.Ю., Алешина А.Р., Лапицкий С.А. Содержание редкоземельных элементов в водах рек и озер умеренной и бореальной зон // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 6. С. 96–101.

## CONTENT OF RARE EARTH ELEMENTS IN RIVERS AND LAKES OF TEMPERATE AND BOREAL REGIONS

Olga Yu. Drozdova<sup>1</sup>✉, Alisa R. Aleshina<sup>2</sup>, Sergey A. Lapitskiy<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; drozdova@geol.msu.ru✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alisa.aleshina@mail.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lapitsky@geol.msu.ru

**Abstract.** Geochemical characteristics and normalized patterns of rare earth elements (REE) were studied in 16 water samples collected from rivers and lakes in temperate and boreal regions of Russia. It was shown that the studied waters exhibit a typical REE pattern, with light REE being more abundant than heavy REE. Moderate to high positive correlations were observed between REE concentrations and dissolved organic carbon and iron in lake waters, indicating a potential role of organomineral colloids in REE transfer. In some of the studied reservoirs, anomalies of Ce due to its oxidation on the surface of Mn oxides and Fe oxyhydroxide colloids and Eu which is associated with the contribution of groundwater to the nutrition of the studied rivers and lakes were noted.

**Keywords:** rare earth elements, rivers, lakes, boreal zone

**For citation:** Drozdova O.Yu., Alechina A.R., Lapitskiy S.A. Content of rare earth elements in the waters of rivers and lakes of the temperate and boreal zones. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 6: 96–101. (In Russ.).

**Введение.** Редкоземельные элементы (РЗЭ) относятся к элементам, которые имеют важное значение в геохимических процессах, сопровождающих этапы эволюции коры и мантии [Романова и др., 2024]. РЗЭ можно обнаружить в поверхностных водах в различных концентрациях в зависимости от происхождения вод и геологических особенностей региона [Sholkovitz, 1995]. РЗЭ могут быть использованы в качестве маркеров различных геохимических процессов, которые протекают при взаимодействии природных вод с водовмещающими породами [Харитонов, Вах, 2015]. В последнее время РЗЭ активно изучаются во всех типах природных вод [Вах и др., 2018], в том числе из-за того, что они могут являться индикаторами геоэкологического

состояния природно-техногенных систем [Вах, 2014; Чудаев и др., 2015].

На распределение РЗЭ влияют условия водных экосистем, которые контролируют взаимодействие твердой фазы и раствора. К ним относятся такие факторы, как pH, уровень растворенного кислорода, соленость, содержание и состав коллоидов [Amorim, et al., 2019]. Считается, что основным источником поступления РЗЭ в воды озер и морей является взвешенный и растворенный речной сток [Страховенко, Овдина, 2021]. Уменьшение концентраций РЗЭ при последовательной фильтрации природных вод указывает на то, что значительная часть РЗЭ переносится с коллоидами, представленными оксигидроксидами Fe

и Mn и органическим веществом [Ilina, et al., 2016; Davranche, et al., 2017].

Недавние исследования показали, что количество РЗЭ, присутствующих в поверхностных водах, увеличивается из-за ускоренной индустриализации и урбанизации многих регионов по всему миру [Song, et al., 2017; Balaram, 2019]. Высокие уровни РЗЭ в поверхностных водах могут оказывать негативное воздействие на водные экосистемы и здоровье человека [Amorim, et al., 2019]. Поэтому крайне важно продолжить изучение распределения РЗЭ в поверхностных водах с целью оценки воздействия этих элементов на окружающую среду [Hissler, et al., 2014; Ilina, et al., 2016]. На данный момент поведение РЗЭ в поверхностных водах северо-запада Европейской части РФ изучено в незначительном объеме.

Основной целью данного исследования является определение содержания и изучение геохимических характеристик распределения РЗЭ в поверхностных водах бореальной и умеренной зон. Для измерения концентрации растворенных РЗЭ в выбранных образцах воды использовалась масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС).

**Материалы и методы исследования.** Для понимания фонового уровня РЗЭ в поверхностных водах в нормальных условиях было отобрано 16 образцов из рек (9 проб) и озер (7 проб) вдали от крупных промышленных и сельскохозяйственных объектов (рис. 1). Точки отбора проб располагались в Вологодской области (реки Синичка, Кой, Илекса, Ковжа, озера Кубенское, Заилдовское, Панковское) и Республике Карелия (реки Лемб, Лундожда, Ухта, Черпайоки, Оланга, озера Навозеро, Онежское, Коммунар, Ципринга). Самая южная точка отбора проб — река Синичка ( $58^{\circ}51,6'$  с. ш.,  $40^{\circ}11,7'$  в. д.), самая северная — озеро Ципринга ( $66^{\circ}18,4'$  в. д.,  $30^{\circ}42,9'$ ).

Все пробы были отобраны из незагрязненных естественных водоемов различных размеров и типов. Большинство водоемов расположены удаленно друг от друга и не связаны гидрологически. Однако озеро Навозеро расположено в непосредственной близости от реки Лундожда, которая впадает в Онежское озеро. Река Кой также впадает в Кубенское озеро. Пробы были отобраны как из малых, так и из крупных водотоков, в том числе тех, которые ранее не были изучены. Крупнейшие места отбора проб: Кубенское озеро, река Ковжа, Онежское озеро, озеро Ципринга. Климат, рельеф, почва и растительность в районе Северной Карелии (включая реки: Ухта, Черпайоки, Оланга и озеро Ципринга) были описаны в некоторых предыдущих исследованиях [Ilina, et al., 2013; 2014]. Кубенское озеро расположено в заболоченной низине в Вологодской области и имеет ледниково-тектоническое происхождение. Площадь зеркала воды озера варьируется от 370 до 417 км<sup>2</sup>. Дно Кубенского озера преимущественно песчаное, питание смешанное (преимущественно снеговое), в озеро впадает около 30 рек. Река Ковжа

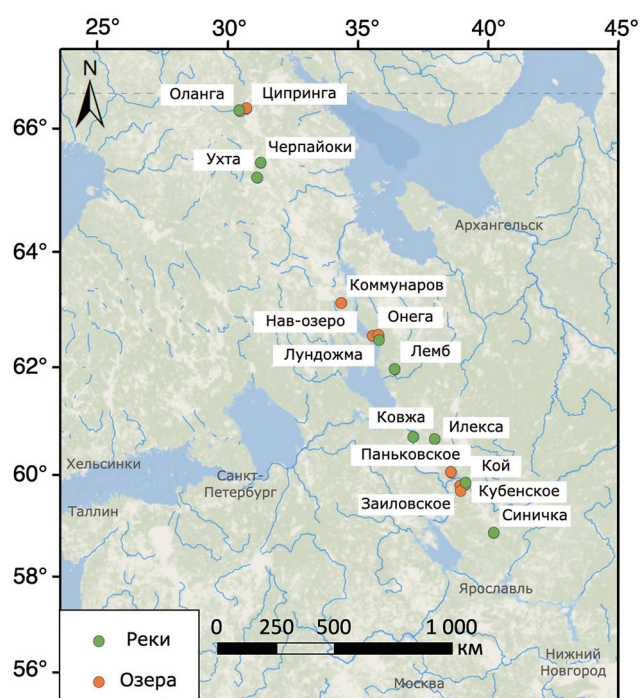


Рис. 1. Карта отбора проб

также находится в Вологодской области и впадает в Белое озеро, относящееся к бассейну реки Волги. Ее длина составляет 86 километров, а площадь водосбора около 5000 км<sup>2</sup>. Онежское озеро является крупнейшим из опробованных объектов и является вторым по величине пресноводным водоемом в Европе. Его площадь составляет 9690 км<sup>2</sup>. Котловина озера имеет тектоническое происхождение и расположена на стыке Балтийского щита и Русской платформы. Пункты опробования Синичка, Кой, Кубенское, Заилдовское, Панковское, Илекса и Ковжа расположены на территории, занятой фанерозойскими отложениями (преимущественно аргиллитами, песчаниками и известняками). Пункты опробования Лемб, Навозеро, Лундожда, Онега, Коммунар, Ухта, Черпайоки, Оланга, Ципринга расположены на территории Балтийского щита, сложенной магматическими и метаморфическими породами кислого состава архея и протерозоя.

Отбор проб воды проводился в июле 2018 года. Значения pH и удельной электропроводности измерялись *in situ* с помощью pH-метра Hanna HI 9025 и кондуктометра Hanna HI 9033, соответственно. Сразу после отбора пробы вод пропускались через фильтры с размером пор 0,22 мкм (Steritor, "Millipore"). Образцы вод собирались в предварительно очищенные поливинилхлоридные банки и хранились в холодильнике до поступления в лабораторию. Основные и микроэлементы (включая РЗЭ) растворов анализировались методом ИСП-МС (индуктивно-связанная плазма–масс-спектрометрия; 7500, "Agilent Technologies"), относительная погрешность измерений составила  $\pm 3\%$ . Точность анализов оценивалась с использованием международного

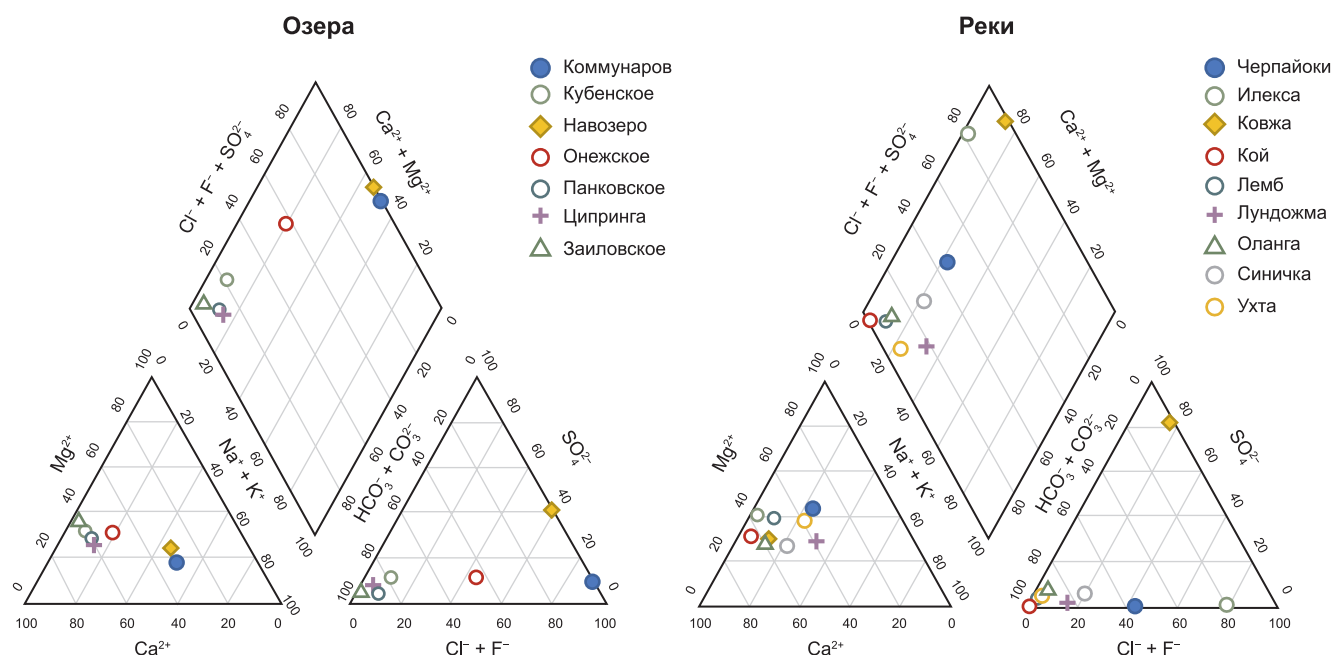


Рис. 2. Диаграмма Пайпера для исследуемых вод

стандарта речной воды SLRS-4, расхождение измеренных и сертифицированных концентраций исследуемых элементов не превышало 20 %. Растворенный органический углерод (POY) определялся с помощью CN-анализатора для жидких проб (LiquiTOC trace, “Elementar”) с пределом обнаружения 1 мг/л и воспроизводимостью 5 %. Неорганические анионы измерялись методом ионной хроматографии (Dionex ICS-2000, “Thermo”). Количество РЗЭ, связанное с органическими веществами в исследуемых водоемах, рассчитывалось с использованием программы Visual MINTEQ версия 3.1. Входными данными являлись pH, концентрации основных катионов, анионов, POY, микроэлементов и РЗЭ в пробах. В расчетах использовалась Стокгольмская гуминовая модель (SHM) для комплексообразования металлов с органическим веществом.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Воды озера Навозеро имели низкий pH (5,1). Воды из других проб варьировались от нейтрального до слабощелочного (6,1–8,7). Значение pH увеличивалось от малого озера к реке и большому озеру, при этом увеличиваясь от озера Навозеро (5,1) к реке Лундожда (7,1) и Онежскому озеру (7,2) соответственно. Значение pH вод реки Кой ниже, чем в озере Кубенское, в которое она впадает (7,8 и 8,7 соответственно). Значения окислительно-восстановительных потенциалов ( $E_h$ ) вод были типичны для поверхностных вод, их значения варьировались от 160 мВ в озере Панковское до 352 мВ в наиболее окисленных водах Навозера. Значения удельной электропроводности значительно различались в разных пробах, составляя от 7 до 163 мкСм/см для озер и от 26 до 307 мкСм/см для рек.

По анионному составу большинство рек и озер гидрокарбонатные, по катионному — кальциевые (рис. 2). Исключением являются воды озера Навозеро

и Коммунар, которые находятся на границе хлоридно-натриевого и хлоридно-кальциевого типов. Воды Онежского озера относятся к смешанному, ближе к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Воды рек Ковжа и Илекса — хлоридно-кальциевого типа.

Средняя концентрация POY в пробах речных водах была на 2 мг/л выше, чем в озерных водах (14 мг/л и 12 мг/л соответственно). В пробе из реки Кой уровень POY составил 19 мг/л, а в озере Кубенском, куда впадает эта река, концентрация составила 16 мг/л. Самая низкая концентрация POY наблюдалась в пробе воды озера Навозеро (4,5 мг/л). В реке Лундожда концентрация POY составила 26 мг/л, в Онежском озере — 7 мг/л.

В исследованных реках средняя концентрация растворенного железа была более чем в два раза выше по сравнению с образцами озерной воды (в среднем 474 мкг/л и 178 мкг/л, соответственно). Содержание железа в образцах речной воды варьировалось от 62 мкг/л (Илекса) до 1266 мкг/л (Черпайоки). В озерах концентрации железа варьировались от 13 мкг/л (Ципринга) до 501 мкг/л (Коммунар).

Общее содержание РЗЭ в исследованных образцах варьировалось от 0,02 до 4,4 мкг/л (рис. 3). Самые низкие концентрации были обнаружены в образцах из озер Навозеро и Заилловское (0,02 мкг/л) и реки Илекса (0,04 мкг/л). Самые высокие общие концентрации РЗЭ наблюдались в образцах из реки Синичка (4,4 мкг/л).

Средние концентрации РЗЭ в образцах в целом соответствуют обобщенной последовательности  $Ce > La > Nd > Pr > Sm > Gd > Dy > Yb > Er > Eu > Ho > Tb > Lu > Tm$ , которая согласуется с правилом Оддо-Харкинса [Zhenggui, et al., 2001]. Соотношение между La и Yb может быть использовано для представления более тяжелых и более легких групп РЗЭ [Andersson, et al., 2006]. По полученным данным (рис. 4) видно,

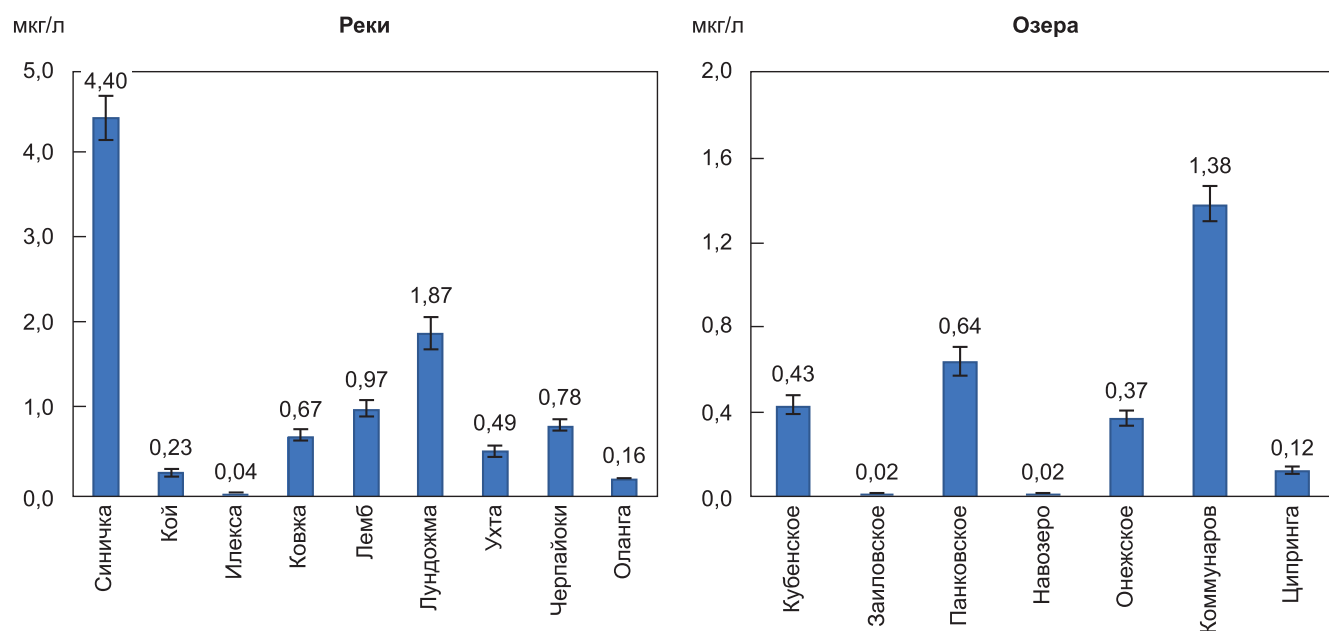


Рис. 3. Сумма концентраций РЗЭ в исследованных образцах вод (в мкг/л)

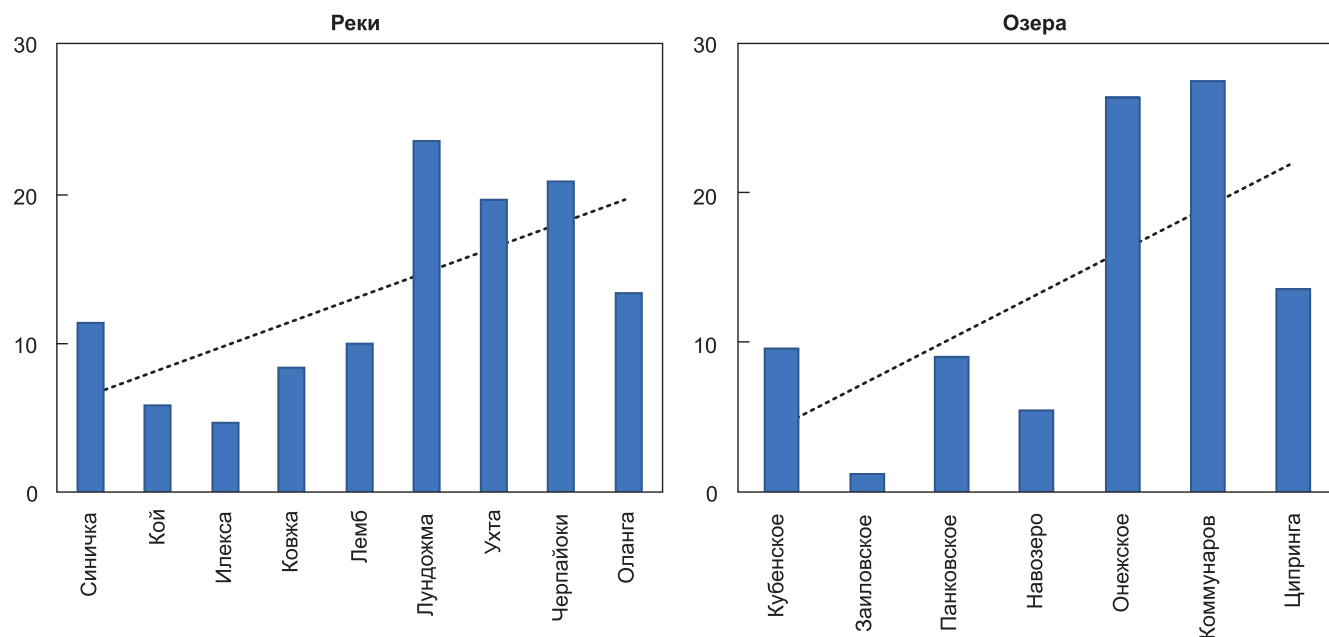


Рис. 4. Соотношение La/Yb в исследованных образцах вод

что концентрация более тяжелых РЗЭ была ниже, чем концентрация более легких РЗЭ. Отношение La/Yb варьировалось от 1 до 28 и в целом увеличивалось с юга на север в образцах вод, при этом самые высокие значения наблюдались в образцах воды из озер Коммунарлов и Онежского, а также реки Лундожма.

Умеренная и высокая положительная корреляция ( $R^2$ ) между РЗЭ и Fe и DOC (0,71–0,91 и 0,33–0,79) наблюдалась в озерах, тогда как в реках такой корреляции не было обнаружено (0,17–0,36 и 0,27–0,42).

Распределение РЗЭ в природных материалах и водах обычно можно представить с помощью нормализованных спектров РЗЭ относительно сланцев [Gromet, et al., 1984]. Так, нормализация концентраций РЗЭ по данным Североамериканского сланцевого композита (NASC) позволяет распозна-

вать аномальную концентрацию для отдельного РЗЭ (как положительные или отрицательные аномалии) [Gromet, et al., 1984, Taylor, et al., 1985]. Некоторые аномалии могут возникать из-за окислительно-восстановительного поведения Ce и Eu, которые могут существовать в двух различных состояниях окисления ( $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  и  $Eu^{2+}/Eu^{3+}$ ). На рис. 5 приведены нормализованные на сланец (NASC) спектры РЗЭ в исследованных водах, где видно, что самые низкие спектры РЗЭ характерны для вод с самыми низкими концентрациями РОУ (3–11 мг/л). Расчеты моделирования с использованием программы Visual MINTEQ показали, что 97–100 % изученных РЗЭ были связаны с органическими лигандами в исследованных образцах воды. Эти данные согласуются с предыдущими исследованиями по формам нахож-



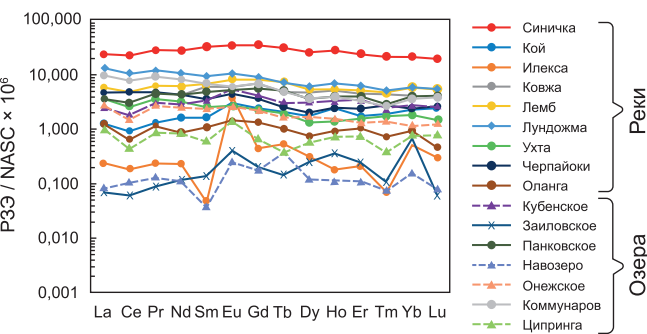


Рис. 5. Нормализованные на сланец (NASC) спектры РЗЭ в исследованных водах

дения РЗЭ в природных водах, которые подчеркнули значительную роль органического вещества в комплексообразовании и мобилизации этих элементов в водной среде, особенно в пресноводных системах с низкой и умеренной соленостью [Pédrot, et al., 2015; Davranche, et al., 2017].

Для того чтобы исключить влияние правила Оддо–Харкинса, приводящего к характерной зигзагообразной форме распространенности лантаноидов на логарифмических графиках, рассчитывались значения  $\delta\text{Ce}$  и  $\delta\text{Eu}$  (аномалии Ce и Eu, соответственно) [Bolhar, Vankranendonk, 2007; Kulaksiz, Bau, 2013; Wang, et al., 2019]. Значения  $\delta\text{Ce}$  для всех вод, за исключением реки Черпайоки и озера Навозеро (для которых  $\delta\text{Ce} = 1,1$ ), показали слабые отрицательные аномалии Ce в диапазоне от 0,6 до 0,9 (рис. 6). Процессы, которые преобразуют  $\text{Ce}^{3+}$  в  $\text{Ce}^{4+}$ , включают биологически опосредованное окисление [Moffett, 1990, 1994] и абиотическое окисление на поверхности оксидов марганца и коллоидов и частиц оксигидроксида железа [Sholkovitz, 1995; Pédrot, et al., 2015; Ilina, et al., 2016; Davranche, et al., 2017]. Для существования этого минимума требуются высокие концентрации растворенного железа и насыщенная кислородом среда, и эти условия были выполнены в исследуемых образцах рек и мелководных озер. Положительные аномалии Eu показаны на рис. 6. Значение  $\delta\text{Eu}$  варьировалось от 0,98 до 26 для рек и от 0,88 до 3,05 для озер. Максимальная концент-

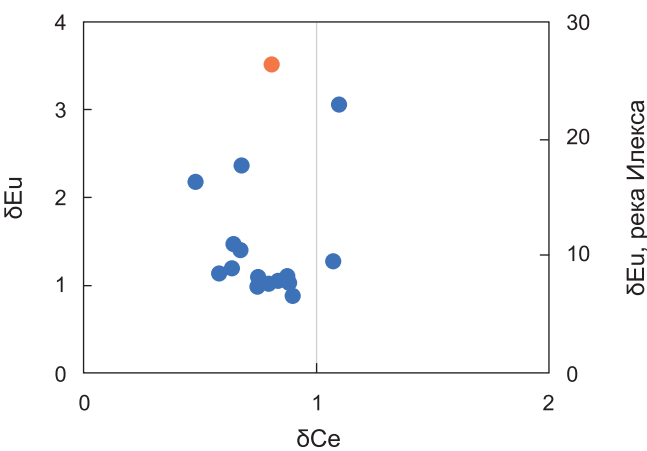


Рис. 6. Диаграмма  $\delta\text{Ce}$ - $\delta\text{Eu}$  редкоземельных элементов для исследованных образцов воды (река Илекса отмечена оранжевым цветом)

рация Eu в исследованных реках и озерах может быть связана с их питанием из грунтовых вод [Ilina, et al., 2016].

Для большинства более легких РЗЭ, таких как La, Ce, Nd и Eu, средние концентрации в исследованных реках выше по сравнению с данными по содержаниям их в реках мира [Savenko, et al., 2024]. Особенно эта тенденция заметна для La и Ce. В то же время средние концентрации Pr и Sm оказались в несколько раз ниже среднемировых значений (рис. 7). Для более тяжелых редкоземельных элементов (РЗЭ), начиная с Gd, наблюдается иная картина: средняя концентрация этих элементов в исследованных реках либо совпадают, либо ниже по сравнению с данными по рекам мира.

Полученные результаты указывают на отличительные особенности распределения РЗЭ в речных водах бореальных и умеренных зон по сравнению с мировыми тенденциями. Преобладание более легких РЗЭ может быть связано с геохимическими процессами и источниками поступления РЗЭ, характерными для данного региона.

**Заключение.** Было показано, что изученные воды рек и озер из бореальной и умеренной зон характеризуются различным содержанием редкоземельных

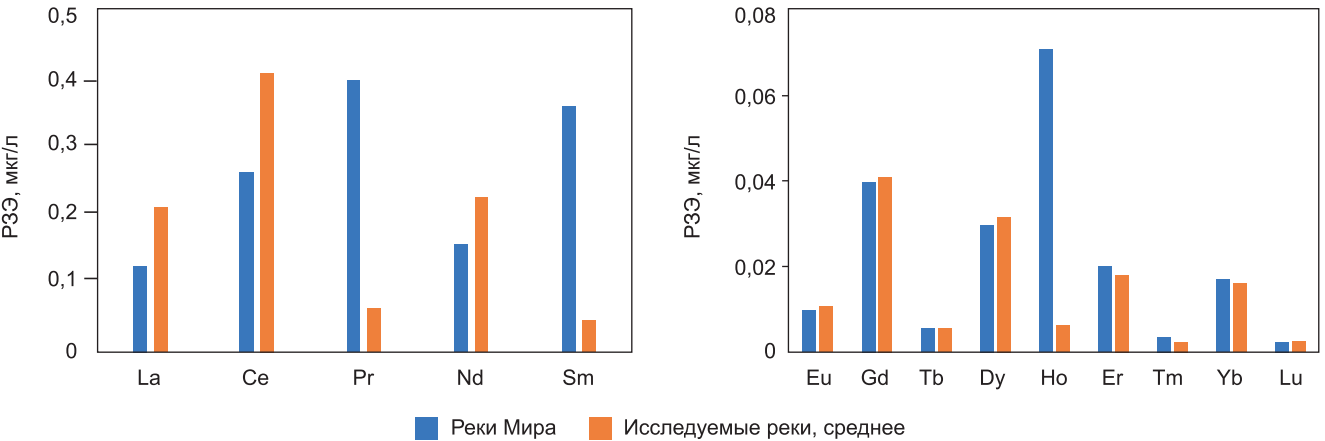


Рис. 7. Сравнение концентраций РЗЭ в исследованных реках и реках мира по [Savenko, Savenko, 2024]

элементов, которое в первую очередь контролируется не геологической основой, а гидрохимическими свойствами изучаемых водных систем.

Наблюдалась умеренная или высокая положительная корреляция между содержанием РЗЭ и Fe и органическим углеродом в растворенной (< 0,22 мкм) фракции вод озер. В образцах из крупных рек и некоторых озер были отмечены аномалии Се из-за его окисления на поверхности коллоидов оксидов Mn и оксигидроксида Fe. Наблюдаемые

аномалии Eu связаны со значительным вкладом подземных вод в питание изучаемых рек и озер.

Для полного понимания поведения РЗЭ в пресноводных экосистемах с целью оценки долгосрочного воздействия на биоту, окружающую среду и здоровье человека необходимы дальнейшие исследования.

**Финансирование.** Исследование проводилось в рамках государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вах Е.А., Петухов В.И., Вах А.С. и др. Содержание редкоземельных элементов в речных водах Еврейской автономной области // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. 2018. С. 96–99.

Вах Е.А. Геохимия редкоземельных элементов в природных и техногенных водах юга Дальнего Востока России. М.: ДВФУ, 2014. 160 с.

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. 171–179.

Романова Т.И., Коротков М.Г., Коржов Ю.В. Распространенность редкоземельных элементов в природных водах г. Ханты-Мансийска // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2024. Т. 335, № 7. С. 20–32.

Харитонова Н.А., Вах Е.А. Редкоземельные элементы в поверхностных водах Амурской области: особенности накопления и фракционирования // Вестник Томского государственного университета. 2015. № 396. С. 232–244.

Чудаев О.В., Челноков Г.А., Брагин И.В. и др. Фракционирование редкоземельных элементов в реках Восточного и Южного Сихотэ-Алиня в условиях природных и антропогенных аномалий // Тихоокеанская геология. 2015. Т. 34, № 6. С. 34–44.

Amorim A.M., Sodré F.F., Rousseau T.C.C., et al. Assessing rare-earth elements and anthropogenic gadolinium in water samples from an urban Artificial Lake and its tributaries in the Brazilian federal district // Microchemical Journal. 2019. Vol. 148. P. 27–34.

Andersson K., Dahlqvist R., Turner D., et al. Colloidal rare earth elements in a boreal river: changing sources and distributions during the spring flood // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2006. Vol. 70. P. 3261–3274.

Balaram V. Rare earth elements: a review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling and environmental impact // Geoscience Frontiers. 2019. Vol. 10. P. 1285–1303.

Bolhar R., Vankranendonk M. A non-marine depositional setting for the Northern Fortescue group, Pilbara Craton, inferred from trace element geochemistry of stromatolitic carbonates // Precambrian Research. 2007. Vol. 155. P. 229–250.

Davranche M., Gruau G., Dia A., et al. REE in waterlogged soil and sediments // Rare Earth Elements in wetlands. 2017. P. 135–162.

Gromet L.P., Haskin L.A., Korotev R.L., et al. The “North American Shale composite”: its compilation, major and trace element characteristics // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1984. Vol. 48. P. 2469–2482.

Hissler C., Stille P., Guignard C., et al. Rare earth elements as hydrological tracers of anthropogenic and critical zone contributions: a case study at the Alzette river basin Scale // Procedia Earth and Planetary Science. 2014. Vol. 10. P. 349–352.

Ilna S.M., Drozdova O.Yu., Lapitskiy S.A., et al. Size fractionation and optical properties of dissolved organic matter in the continuum soil solution-bog-river and terminal lake of a boreal watershed // Organic Geochemistry. 2014. Vol. 66. P. 14–24.

Ilna S.M., Lapitskiy S.A., Alekhin Y.V., et al. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water–mire–humic lake–river–large oligotrophic lake of a subarctic watershed // Aquat. Geochem. 2016. Vol. 22. P. 65–95.

Ilna S.M., Poitrasson F., Lapitskiy S.A., et al. Extreme iron isotope fractionation between colloids and particles of boreal and temperate organic-rich waters // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2013. Vol. 101. P. 96–111.

Kulaksız S., Bau M. Anthropogenic dissolved and colloid/nanoparticle-bound samarium, lanthanum and gadolinium in the Rhine River and the impending destruction of the natural rare earth element distribution in rivers // Earth and Planetary Science Letters. 2013. Vol. 362. P. 43–50.

Moffett J.W. Microbially mediated cerium oxidation in sea water // Nature. 1990. Vol. 345. P. 421–423.

Moffett J.W. A Radiotracer study of cerium and manganese uptake onto suspended particles in Chesapeake Bay // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1994. Vol. 58. P. 695–703.

Pédrot M., Dia A., Davranche M., et al. Upper soil horizons control the rare earth element patterns in shallow groundwater // Geoderma. 2015. Vol. 239–240. P. 84–96.

Savenko A.V., Savenko V.S. Trace element composition of the dissolved matter runoff of the Russian Arctic Rivers // Water. 2024. Vol. 16(4). P. 565.

Sholkovitz E.R. The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries // Aquat Geochem. 1995. Vol. 1. P. 1–34.

Song H., Shin W.-J., Ryu J.-S., et al. Anthropogenic rare earth elements and their spatial distributions in the Han River, South Korea // Chemosphere. 2017. Vol. 172. P. 155–165.

Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution; blackwell scientific. Oxford, 1985.

Wang L., Han X., Ding S., et al. Combining multiple methods for provenance discrimination based on rare earth element geochemistry in lake sediment // Science of The Total Environment. 2019. Vol. 672. P. 264–274.

Zhenggui W., Ming Y., Xun Z., et al. Rare earth elements in naturally grown fern *dicranopteris linearis* in relation to their variation in soils in South-Jiangxi region (Southern China) // Environmental Pollution. 2001. Vol. 114. P. 345–355.

Статья поступила в редакцию 21.04.2025,  
одобрена после рецензирования 23.05.2025,  
принята к публикации 26.12.2025