

УДК (550.42:546.65):551.312(571.1/5)

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВОДАХ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ МАЛЫХ ОЗЕР БАРАБИНСКОЙ НИЗМЕННОСТИ И КУЛУНДИНСКОЙ РАВНИНЫ

Страховенко Вера Дмитриевна<sup>1</sup>,  
strahova@igm.nsc.ru

Овдина Екатерина Андреевна<sup>1</sup>,  
ovdina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С., СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 3.

**Актуальность** исследования обусловлена необходимостью наращивания сырьевой базы сапропелевого сырья в Сибирском регионе. В Барабинской низменности и Кулундинской равнине преобладают бессточные озера, среди которых господствующее положение занимают малые водоемы (97,5 %) с сапропелевыми залежами на дне. Это связано с наличием своеобразного гривного рельефа для данных территорий, сформированного суффозионно-дефляционными процессами. Учитывая разнообразие озер, актуальным является изучение факторов, определяющих геохимический состав образующихся сапропелей.

**Цель:** определить геохимические особенности миграции и фракционирования РЗЭ в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины и на базе изучения лантаноидов реконструировать основные источники поступления вещества в формирующиеся сапропелевые залежи.

**Объекты:** воды и органоминеральные залежи малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Распределения РЗЭ компонентах озерных систем юга Западной Сибири слабо изучены, особенно в водах.

**Методы.** Полевые методы – керн донных отложений, воды отобраны с катамарана по стандартным методикам при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см) и батометра на 1 литр. В полевых условиях определены все переменные физико-химические параметры вод и донных отложений. Весь объем воды фильтровали методом вакуумной фильтрации с использованием фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Аналитические методы – водные пробы проанализированы на макро- и микроэлементы в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск. Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10Avp, SHIMADZU), а органический углерод – методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония). Микроэлементы определены методом индуктивно связанной плазмы (ICP-MS Agilent 7500 и 7500с) (аналитик Е.В. Еловский) и методом атомной абсорбции ИГМ СО РАН (аналитик Л.Н. Букреева). Изучение морфологии, фазового состава образцов донных отложений различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания). Содержание РЗЭ определялись в 112 пробах донных отложений методом ИСП-МС.

**Результаты.** Применение уникального методического подхода, выраженного в проведении современных биогеохимических, минералогических, геохимических исследований отдельно взятого озера в тесной взаимосвязи со всей системой компактно расположенных озёр (озёрной системой) на детально подобранных озерных системах: Барабинская, Куйбышевская (Барабинская низменность) и Танатарская, Петуховская (Кулундинская равнина), дало представление о связи современного формирования состава донных осадков с биогеохимией озерных вод, с составом почв и почвообразующих пород водосборных площадей озера, химическим составом автохтонной биоты и с ландшафтными условиями. Использование современных аналитических методов позволило оценить уровни концентраций и закономерности распределения РЗЭ в водах и донных осадках озер из разных ландшафтных зон с различным геохимическим типом вод (от ультрапресных до рассолов) и классом сапропеля (кремнезёмистого, кальциевого, смешенного с разными генетическими типами).

### Ключевые слова:

Малые озера юга Западной Сибири, геохимия, минералогия, редкоземельные элементы, вода, донные отложения.

### Введение

Изучение минералогических особенностей и геохимического состава осадочного вещества малых озер Сибири позволяет глубже понять процессы современного континентального седиментогенеза. В формировании донных отложений озер и морей участвует вещество, поступающее из разных источников: происходит, с одной стороны, смешение автохтонных и аллохтонных источников (усреднение химического состава), с другой стороны – дифференциация элементов, обусловленная присутствием их в разных формах в поверхностных водах [1–10 и др.]. Для озер Сибири важным является аккумуляция

льдом рассеянного осадочного вещества в длительный период ледостава (более 6 месяцев в году) и ураганным поступлением этого материала в период снеготаяния. Это обусловлено специфическим гривнолощинным рельефом, имеющим широкое развитие на территории Барабинской низменности и Кулундинской равнины, сложенным лессовыми отложениями, генетически связанными с суффозионно-дефляционными процессами [11].

В современных исследованиях широкое развитие получило применение различных реконструкций на базе изучения лантаноидов при решении ряда принципиальных вопросов литологии и палеогеографии

[12–19 и др.]. Считается, что основным источником поступления РЗЭ в воды океанов, морей и озер является взвешенный и растворенный речной сток, подчиненное значение имеют эоловый перенос, гидротермальная деятельность, ледниковый сток [5, 19 и др.]. По подсчетам В.С. Савенко [20], доля терригенной взвеси в океанской воде для лантаноидов составляет 80 %. Состав лантаноидов речных вод соответствует составу лантаноидов в континентальных глинах или среднему составу сланцев. РЗЭ в воде могут входить в состав твердой терригенной фракции взвеси; сорбироваться на поверхности взвеси, образуя коллоидные соединения; находиться в растворенной форме (ионной и комплексной) и их соотношения может сильно варьировать в разных водоёмах [8]. Цель работы – определить геохимические особенности миграции и фракционирования РЗЭ в водах и донных отложениях малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины и на базе изучения лантаноидов реконструировать основные источники поступления вещества в формирующиеся сапропелевые залежи.

#### Объекты и методы исследования

Объекты исследования – воды и органоминеральные залежи малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины. Котловины исследуемых озер локализованы в основном в осадочных континентальных озерно-аллювиальных отложениях неогена и четвертичного периодов, которые представлены лессовидными отложениями от тяжелосуглинистых и глинистых на севере до средне- и легкосуглинистых и супесчаных на юге, оказывающими непосредственное влияние на формирование рельефа, почв, растительного покрова [21]. В Барабинской низменности и Кулундинской равнине резко преобладают бессточные озера, среди которых господствующее положение занимают малые водоемы (97,5 %) размером до 2,5 км<sup>2</sup>. Это связано с наличием своеобразного гривного рельефа для данных территорий, генетически связанного с суффузионно-дефляционными процессами. Из-за перетока влаги с водоразделов глив в межгливные долины (чередование параллельно простирающихся с ЮЗ на СВ удлиненных холмов (глив) и понижений) в депрессиях рельефа скапливается вода – образуются озера [11]. Важно отметить, что лессовидные суглинки, которые распространены в Барабинской низменности и Кулундинской равнине, покрывающие слоем от 0,2 до 1,5 м и более гривообразные и увалообразные возвышения, имеют эоловый генезис. Это определяет значительную гомогенизацию гранулометрического и химического составов почвообразующих пород и почв, а следовательно, и взвешенного материала, поступающего в озера со снеготальными водами. Резкое преобладание кислого и среднего плагиоклаза в составе суглинков (около 65 % от общей массы минералов) определяет наличие большого количества содового типа вод на всей территории. Климат района резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха колеблется от –1 до 0 °С со среднемесячными максимумами в июле плюс 19–20° и минимумами в

январе минус 21–22°. Среднегодовое количество осадков составляет 350–375 мм, период ледостава на озерах длится около 6–7 месяцев.

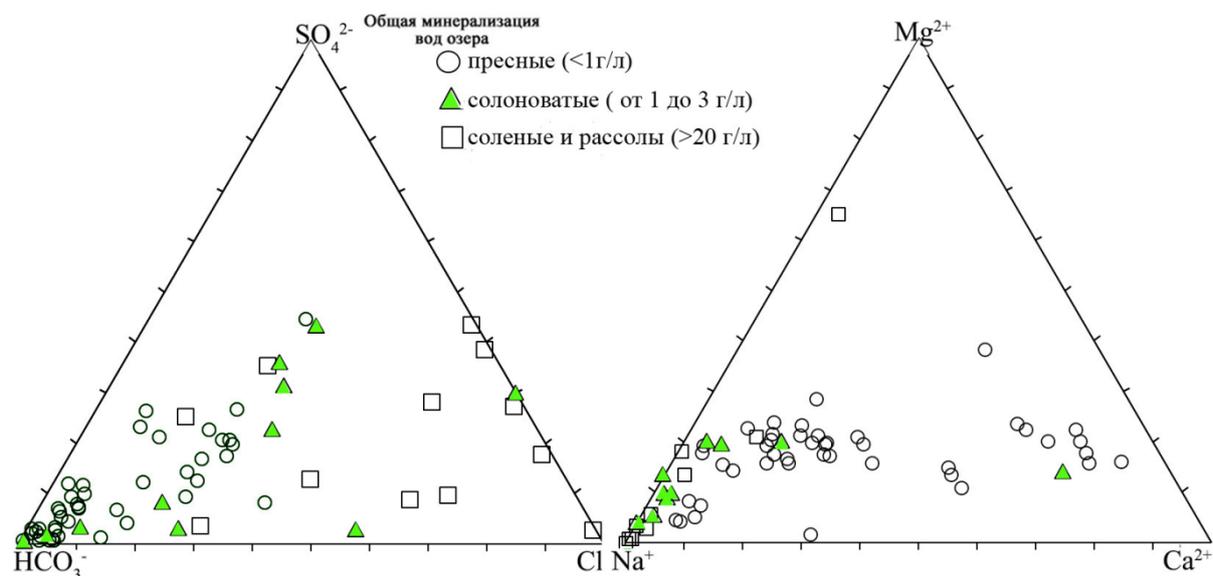
Методы анализа подробно описаны нами при изучении минерального и химического состава сапропелей малых озер Сибири [22, 23]. Во время полевых работ произведен отбор керн донных отложений и воды с катамарана по стандартным методикам при помощи цилиндрического пробоотборника с вакуумным затвором конструкции НПО «Тайфун», Россия (диаметр 82 мм, длина 120 см). В полевых условиях определены все переменные физико-химические параметры вод и донных отложений. Для отбора водных проб использовали батометр на 1 литр. Весь объем воды фильтровали методом вакуумной фильтрации с использованием специально подготовленных заранее взвешенных мембранных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм. Фильтры со взвесью помещались в чашки Петри. Фильтраты воды консервировались концентрированной азотной кислотой из расчета 1 мл кислоты на 100 мл пробы для последующего определения в них металлов и микроэлементов. При аналитическом определении металлов принято считать растворенными формами те, что проходят через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм, взвешенными – те, что остаются на фильтре. Водные пробы проанализированы на макро- и микроэлементы в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН и ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН, Новосибирск (47 проб). Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии (HPLC-10AVp, SHIMADZU), а органический углерод – методом ИК-детектирования на анализаторе TOC-V (Shimadzu, Япония). Микроэлементы определены методом индуктивно связанной плазмы (ICP-MS Agilent 7500 и 7500с) (аналитик Е.В. Еловский) и методом атомной абсорбции ИГМ СО РАН (аналитик Л.Н. Букреева). Точность определения микроэлементов составляла не менее 1 % и РЗЭ не менее 5 % RSD. Изучение морфологии и фазового состава образцов донных отложений различных классов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Чехия), снабженного энергетическим спектрометром «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, Великобритания). Содержание РЗЭ определялись в 112 пробах донных отложений методом ИСП-МС. Точность и воспроизводимость анализов определялись с использованием стандартных образцов. Параллельные образцы вод и донных отложений использовались для оценки воспроизводимости: каждый 10-й образец дублировался и анализировался в строгом соответствии с методикой. Анализы выполнены научными сотрудниками аналитического центра ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

#### Результаты и их обсуждение

Согласно литературным данным на территории лесостепи и степи Барабинской низменности, Кулундинской равнины происходит интенсивная аккумуляция легкорастворимых солей, и в связи с этим состав

озёрных вод отличается широким спектром солёности: от пресных до рассолов [24]. Важно отметить, что согласно нашим предыдущим исследованиям, основные характеристики вод (степень минерализации вод, значение pH, содержание растворенного в воде кислорода, концентрации органического вещества (по БПК<sub>5</sub>), гидрокарбонатов, сульфатов, нитратов и фосфатов) изученных озёр, расположенных компактно на небольшой территории, могут значительно отличаться

(более чем 2–5 раз). Так как глубина озёр не превышает 5 м, воды хорошо перемешиваются, не испытывают недостатка света и биогенных элементов. По содержанию главных ионов воды озёр в основном гидрокарбонатно Na и гидрокарбонатно Na-Mg-Ca, щелочные, со значениями pH от 7,6 (оз. Малиновое) до 10 (оз. Жилое-К) (рис. 1). Значения общей минерализации озёрных вод варьируют от пресных (от 0,11 до 0,98 г/л) до рассолов (от 24 до 89 г/л).



**Рис. 1.** Диаграммы катионного и анионного состава вод изученных озёр с учетом величины их общей минерализации вод: круг – пресные с минерализацией вод до 1 г/л; треугольник – солоноватые, минерализация вод от 1 до 3 г/л; квадрат – рассолы, минерализация вод более 20 г/л

**Fig. 1.** Diagrams of the cationic and anionic composition of the waters of the studied lakes, taking into account the value of their total water salinity: circle – fresh water with salinity up to 1 g/l; triangle – brackish, water salinity is from 1 to 3 g/l; square – brines, water salinity is more than 20 g/l

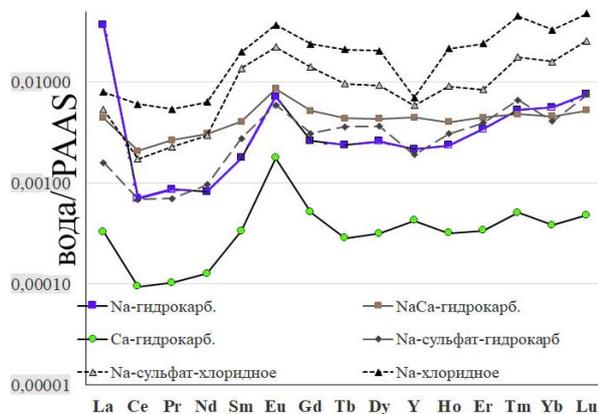
К солоноватым водам можно отнести воды озёр Песчаное, Цыбово, Чистое, Жилое, Демкино, Рублево, так как их минерализация меняется в пределах от 1 до 3 г/л. Практически во всех озерных водах прослеживается корреляция значений окислительно-восстановительного потенциала и коэффициента кислотности/щелочности. Это указывает на сходные гидрологогеологические условия для них. Насыщение вод растворенным кислородом соответствует экологическому оптимуму (от 5,7 до 13,0 мг/дм<sup>3</sup>). Количество органического вещества в воде варьирует (БПК<sub>5</sub>=1,9–7,44 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>), поэтому данные озера можно отнести к эвтрофному и гипертрофному типам. Исходя из данных условий в озерах формируются органо-минеральные донные отложения макрофитного, планктонного и макрофитно-планктонного генезиса (сапропели). Зарастания макрофитами озёр данной территории, так же как и уровень продуктивности водных фитоценозов, значительно варьируют от озера к озеру. Тростник южный (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) и рогоз узколистный (*Typha angustifolia* L.) доминируют среди макрофитов полупогруженной растительности на фоне преобладания фитопланктона. В озерах с преобладанием макрофитов основные продуценты органического вещества – те-

лорез (*Stratiotes aloides* L.), рдесты (*Potamogeton berchitoldii* Fieb., *P. gramineus* L., *P. perfoliatus* L.), уруть (*Miriophyllum sibiricum* Kom.), роголистник (*Ceratophyllum demersum* L.), ряска (*Lemna trisulca* L.); полупогруженные – рогоз узколистный, тростник южный, осоки (*Carex acuta* L., *C. pseudocyperus* L.) [25]. Массовое развитие макрофитов в литорали определяет бюджет органического углерода и регулирует содержание соединений азота и фосфора в воде и донных отложениях.

Согласно полученным аналитическим данным в сравнении с литературными источниками, в водах изученных озёр концентрации макроэлементов в основном ниже, чем их распространение в гидросфере, а для микроэлементов находятся на уровне значений, приведенных для северных озёр Евразии. Озерные воды обогащены группой элементов, которые обычно находятся в виде взвеси и/или взвесью сорбируются (Al, Fe, Mn, Cu, Zn). В озерных водах наблюдаются более высокие значения C и P, чем в гидросфере [26].

В водах озёр содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне – от 0,05 до 155,3 мкг/л, при этом воды также различаются по величинам отрицательной Ce/Ce\* ( $Ce/Ce^* = 2(Ce_n)/(La_n + Pr_n)$ ) и положительной Eu/Eu\* ( $Eu/Eu^* = 2(Eu_n)/(Sm_n + Gd_n)$ ) аномалии. Авто-

рами использована нормализация, общепринятая в морской геохимии, по среднему образцу постаршейских австралийских сланцев (PAAS) [27]. Спектры распределения РЗЭ в водах озер (сгруппированных по основному 6 ионам вод), нормированные по PAAS, приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Нормированные на PAAS спектры распределения РЗЭ в современных водах малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины в зависимости от типа вод: Na-гидрокарбонатные (от ультрапресных до рассолов), NaCa-гидрокарбонатные (от ультрапресных до солоноватых), Na-сульфатно-гидрокарбонатные (от пресных до соленых), Na-сульфатно-хлоридные (от соленых до рассолов), Na-хлоридные (от соленых до рассолов), Ca-гидрокарбонатные (пресные)

**Fig. 2.** PAAS-normalized REE distribution spectra in the modern waters of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, depending on the type of water: Na-bicarbonate (from ultra-fresh to brine), NaCa-bicarbonate (from ultra-fresh to brackish), Na-sulfate-bicarbonate (from fresh to salty), Na-sulfate-chloride (from salty to brine), Na-chloride (from salt to brine), Ca-bicarbonate (fresh)

Воды отдельно взятой системы озер (например, Барабинской или Танатарской) различаются не только по общему содержанию REE ( $\Sigma\text{REE}=0,09\text{--}1,65$  мкг/л и  $0,03\text{--}2,66$  мкг/л соответственно), но и величинами аномалий церия и европия.

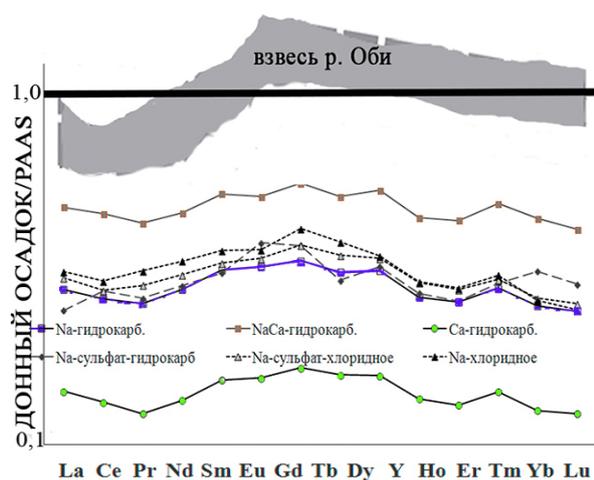
Сопоставление особенностей распределения РЗЭ в различных типах вод из озер разных ландшафтных зон показывает, что в целом спектры распределения различных типов вод имеют сходную конфигурацию, характеризуются направленностью кривых в сторону слабого обогащения по тяжелым и средним лантаноидам, ярко выраженной положительной аномалией по европию ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* - 1,1\text{--}19,3$ ) и отрицательной аномалией церия ( $\text{Ce}/\text{Ce}^* - 0,03\text{--}0,98$ ). Обычно поверхностные и подземные воды наследуют распределение редкоземельных элементов в породах, через которые они протекают [12, 14, 16, 18 и др.]. Наличие высокой положительной Eu аномалии указывает на то, что существенный вклад в формирование состава вод внесло взаимодействие метеорных вод с осадочными породами – покровными лессовидными суглинками, которые на 60–80 % состоят из полевого шпата (альбит,

олигоклаз, андезин). В сульфат-хлоридных и хлоридных Na водах выявлена отрицательная Y аномалия. Согласно литературным данным, накопление РЗЭ в водах часто контролируется процессами эвапоритизации. В изученных водах озер прямой корреляции между уровнем минерализации вод и величиной  $\Sigma\text{REE}$  не выявлено. Но если проанализировать особенности распределения РЗЭ в различных типах вод (т. е. средние значения РЗЭ в водах, сгруппированных по основным макроэлементам), то прослеживается увеличение количества РЗЭ при нарастании степени метоморфизации вод. Особенно низкими концентрациями РЗЭ, при аналогичном спектре распределения лантаноидов, отличаются  $\text{HCO}_3\text{--Ca}$  воды, это, вероятно, указывает на то, что основным источником их поступления в озеро являются снеготалые воды.

Для определения фациальных условий осадконакопления и климата возможно применение некоторых индикаторных отношений РЗЭ или их групп:  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$ ,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$ , где  $\Sigma\text{Ce}:(\text{La}\text{--}\text{Eu})$ ,  $\Sigma\text{Y}:(\text{Gd}\text{--}\text{Lu}, \text{Y})$  и др. [16, 18, 28 и др.]. Согласно научным статьям, коэффициент  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  отражает фациальные условия седиментации и может показывать степень обогащения легкими редкими землями относительно тяжелых. Но при изучении распределения РЗЭ в водах исследуемых озер коэффициент  $\text{La}_n/\text{Yb}_n$  оказался неинформативен. Известна (по литературным данным) зависимость значений La от щелочности вод (в высоко щелочных водах  $\text{pH}>9,5$  значения La максимальны), а как показано выше, при характеристике вод озер pH меняется именно в этом диапазоне для большинства озер. Для озерных обстановок, близко расположенных к области сноса,  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  соответствует типу литогенеза, наиболее проявленному в пределах площадей водосбора водоема. При гумидном литогенезе более интенсивно разрушаются полевые шпаты, акцессорные минералы, содержащие лантаноиды цериевой группы, что приводит к увеличению отношения; в аридном климате отношение уменьшается [12]. В.А. Шатров, в отличие от ранее предложенных числовых значений, характеризующих типы литогенеза, предложил несколько иные значения коэффициента:  $<2,5$  – аридный;  $2,5\text{--}4$  – семигумидный-семиаридный;  $>4$  – гумидный [16]. Посчитанные значения коэффициента  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  для вод малых озер Барабинской (варьирует от 3,9 до 13,5) и Куйбышевской систем (4,5–13,2) (гумидный климат) и Танатарской (1,1–2,4) и Петуховской (1,0–1,5) (аридный климат) систем хорошо согласуются с предложенными величинами. Сильно варьируют значения  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  для вод озер, расположенных в ленточных борах, – от 0,9 до 18,8 – независимо от места расположения бора. Результаты исследований показали, что значения коэффициента  $\Sigma\text{Ce}/\Sigma\text{Y}$  хорошо коррелируют с типом литогенеза, характерного для водосборной территории озера, за некоторым исключением (озера ленточных боров).

Вещественный состав сапропелей может иметь серьезные различия в зависимости от его происхождения, органическая часть отличается в первую очередь соотношением биологического вклада различных организмов в формирование отложений. Авторами де-

тально изучена геохимия сапропелевых отложений малых озер юга Западной Сибири [22, 23]. Первичные аналитические данные для научной интерпретации сгруппированы по различным факторам: климатическим зонам площадей водосбора озер, зольности донных отложений, минеральному составу неорганической части и групповому составу органической и т. д. Установлено, что органическая часть сапропелей отличается соотношением вклада биологических видов организмов и имеет значительные различия в групповом составе [22, 23]. Обобщение информации выявило, что, согласно данным рентгеноструктурного анализа и СЭМ, минеральная составляющая представлена довольно постоянным набором основных минералов: кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат, мусковит и/или карбонаты кальцит-доломитового ряда, арагонит. В качестве второстепенных минералов присутствуют: пирит, гидрослюда, хлориты и акцессорные минералы: ильменит, гематит, циркон, монацит, магнетит, апатит, рутил, титанит и др. При этом если карбонаты Са-Mg являются основными минералами, то терригенная фракция имеет тот же набор минералов.



**Рис. 3.** Нормированные на РААС спектры распределения РЗЭ в донных осадках малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины, сгруппированные по типу вод, из которых они формируются. На диаграмму добавлена область распределения РЗЭ в речной взвеси р. Оби (заимствовано из [29]), закрашена серым цветом

**Fig. 3.** PAAS-normalized REE distribution spectra in the bottom sediments of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, grouped by the type of water from which they are formed. The area of REE distribution in the river suspension of the Ob River has been added to the diagram (borrowed from [29]), painted in gray

Анализ распределения РЗЭ в пробах сапропелевых отложений, формирующихся в данных озерах, из всего возможного многообразия их разделения на отдельные группировки позволил выявить общие закономерности. Полученные аналитические данные показали, что в сапропелевых отложениях озер содержание  $\sum REE$  варьирует в широком диапазоне – от 8 до 162 мкг/кг, при этом донные отложения сходны по отсутствию в них как аномалии  $Ce/Ce^*$  (0,89–1,1), так

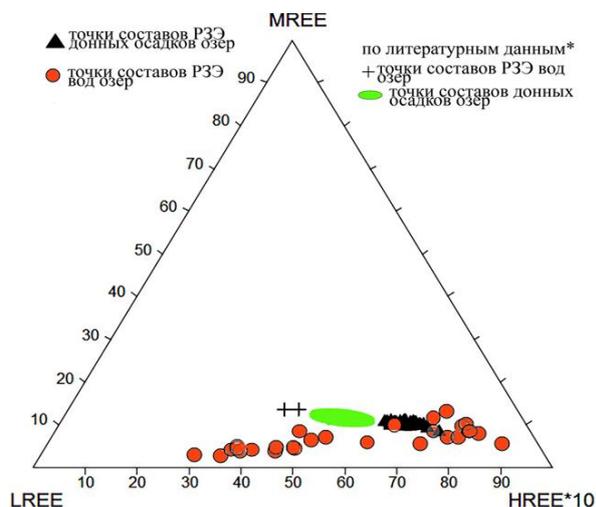
и аномалии  $Eu/Eu^*$  (0,88–1,21). Для донных осадков авторами также использована нормализация по среднему образцу постархейских австралийских сланцев (PAAS) [27]. Распределение редкоземельных элементов в сапропелевых залежах характеризуется пологой дугообразной формой с промежуточным максимумом в области средних РЗЭ (рис. 3). Значение  $\sum Ce/\sum Y$  для сапропелевых отложений исследуемых озер практически постоянно (изменяется от 3,66 до 4,88) и не зависит от места расположения озера. Такое распределение характерно для донных отложений, в которых РЗЭ присутствуют в виде сорбированной взвеси. Для всех изученных органоминеральных отложений малых озер донные отложения отдельных озер отличаются только абсолютными значениями  $\sum РЗЭ$ , которые зависят от минерального состава терригенной фракции, генезиса и количества органического вещества и карбонатов в осадке. По уровню концентрации РЗЭ терригенные фракции сапропелевых залежей близки к их уровню в горных породах водосборных территорий и верхней континентальной коре. Значительное уменьшение абсолютных содержаний РЗЭ происходит при высоких содержаниях органического вещества (органоминеральные сапропели всех классов) и карбонатов (все типы сапропеля Са класса).

Для возможности сравнения одновременно большого количества анализов РЗЭ в водах и донных осадках всех исследуемых озер построена диаграмма LREE-MREE-(HREE×10), где в состав групп включены: легкие (LREE) La-Pr, средние (MREE) Nd-Dy, тяжелые (HREE) лантаноиды Ho-Lu, +Y. Это позволяет одновременно рассмотреть полный состав лантаноидов, выделить области, отвечающие формированиям донных осадков в разных условиях [28]. Источники поступления РЗЭ в донные отложения озер многофакторны, следовательно, сгущение точек на диаграмме будет соответствовать наиболее типичным геологическими процессам, определяющим спектры лантаноидов в них (рис. 4).

Согласно анализу диаграммы распределения РЗЭ в водах и донных отложениях изученных озер отмечается идентичность их поведения для донных осадков, приведенных по литературным данным, и значительно более широкий диапазон распространения для вод. В водах наблюдается относительно небольшое обогащение тяжелыми РЗЭ для вод озер, расположенных в сухостепной зоне, за исключением озер из ленточных боров. Диаграмма LREE-MREE-(HREE×10) для лантаноидов донных осадков позволила выделить единое поле обстановки осадконакопления.

Согласно полученным аналитическим данным, средние содержания РЗЭ сапропелевых отложений разных классов, сформированные из вод разного типа во всех изученных ландшафтных обстановках, различаются в тех же пределах, что и между различными классами сапропелей, образованных из одного типа вод (рис. 2–4). Исключение составляют сапропелевые отложения, образованные из Са-гидрокарбонатных вод. Но в данном случае это, скорее всего, связано с тем, что в этих водах в выборке изученных донных отложений присутствуют только кальциевый и смешанный

класс сапропеля. То есть в этих отложениях высокий процент в составе сапропелевой залежи карбонатов, которые являются разбавителями для величины РЗЭ.



**Рис. 4.** Положение на диаграмме LREE-MREE-(HREE×10) фигуративных точек составов РЗЭ в воде и донных отложениях озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины: треугольник – современные донные осадки изученных озер; круг – в воде изученных озер; + – точки вод озер по литературным данным [28]; овальная серая область – донные осадки озер по литературным данным [28]

**Fig. 4.** Position on the LREE-MREE-(HREE×10) diagram of the figurative points of REE compositions in the water and bottom sediments of the lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain: triangle – modern bottom sediments of the studied lakes; circle – in the water of the studied lakes; + – points of the lake waters according to the literature data [28]; oval gray area – bottom sediments of the lakes according to the literature data [28]

Спектры РЗЭ сапропелевых отложений озер близки по особенностям распределения РЗЭ для речной взвеси р. Оби (заимствовано из [29]) и для сравнения приведено на рис. 3). Характер распределения РЗЭ сапропелевых отложений озер соответствует тренду для осадочных образований дренирующихся водосборов (суглинков) и значительно не различается для изученных ландшафтов территорий Барабинской низменности и Кулундинской равнины, и слабо соответствует спектрам распределения РЗЭ их вод.

#### Заключение

Применение уникального методического подхода, выраженного в проведении современных биогеохимических, минералогических, геохимических исследований отдельно взятого озера в тесной взаимосвязи

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Страхов Н.М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. – М.: Наука, 1993. – 396 с.
2. Савенко А. В., Савенко В. С., Покровский О. С. Новые данные по содержанию растворенных микроэлементов в водах рек Российской Арктики // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. – 2020. – Т. 491. – № 2. – С. 82–88.

со всей системой компактно расположенных озёр (озёрной системой) на детально подобранных озерных системах: Барабинская, Куйбышевская (Барабинская низменность) и Танатарская, Петуховская (Кулундинская равнина), дало представление о связи современного формирования состава донных осадков с биогеохимией озерных вод, с составом почв и почвообразующих пород водосборных площадей озера, химическим составом автохтонной биоты и с ландшафтными условиями. Использование современных аналитических методов позволило оценить уровни концентраций и закономерности распределения редкоземельных элементов в водах и донных осадках озер из разных ландшафтных зон с различным геохимическим типом вод (от ультрапресных до рассолов) и классом сапропеля (кремниевый, кальциевый, смешенный с разными генетическими типами).

Установлено, что содержание  $\Sigma REE$  варьирует в широком диапазоне – от 0,05 до 155,3 мкг/л – в различных типах вод озер разных ландшафтных зон. В целом спектры распределения различных типов вод имеют сходную конфигурацию, характеризуются направленностью кривых в сторону слабого обогащения по тяжелым и средним лантаноидам, ярко выраженной положительной аномалией по европию и отрицательной аномалией церия. Выявлено, что значения коэффициента  $\Sigma Ce/\Sigma Y$  в современных водах озер в основном соответствуют типу литогенеза, характерному для их водосборных территорий. Наличие выраженной положительной аномалии  $Eu/Eu^*$  позволяет предполагать, что распределение РЗЭ в водах озер определяется процессами гидролиза алюмосиликатов, в исходном составе которых основная роль принадлежала полевым шпатам.

Выявлено, что в сапропелевых отложениях озер содержание  $\Sigma REE$  варьирует в широком диапазоне, при отсутствии в них аномалий церия и европия. Спектр РЗЭ в сапропелевых залежах характеризуется пологой дугообразной формой с промежуточным максимумом в области средних РЗЭ, при этом увеличение количества карбонатов или органического вещества определяет уменьшение абсолютных содержаний РЗЭ в осадках. Следовательно, основным поставщиком РЗЭ в сапропелевые отложения малых озер Барабинской низменности и Кулундинской равнины являются частицы взвеси, приносимые в озера, а различия в концентрациях обусловлено количеством органического вещества и карбонатов, образующихся в озерах.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

3. Динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море/ Академик РАН А.П. Лисицын, А.Н. Новигатский, В. П. Шевченко, А.А. Кловиткин, М.Д. Кравчишина, Н.В. Политова // Доклады российской академии наук. Науки о Земле. – 2017. – Т. 472. – № 6. – С. 712–715.
4. The recent deposition of laminated sediments in highly eutrophic Lake Kierskie, western Poland: 1 year pilot study of limnological

- monitoring and sediment traps / K. Apolinarska, K. Pleskot, A. Pelechata, M. Migdalek, M. Siepak, M. Pelechaty // *J. Paleolimnology*. – 2020. – V. 63. – P. 283–304.
5. Budko D.F., Demina L.L., Lisitzin A.P. The heavy metal partitioning in the particle flux of the subarctic White Sea (Northwestern Russia) // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2021. – V. 249. – 107063. DOI: 10.1016/j.ecss. 2020.107063
  6. The soda lakes of Nhecolândia: a conservation opportunity for the Pantanal wetlands / R.L. Guerreiro, Bergier Iv., M. McGlue, L.V. Warren, U. Gomes Pinto de Abreu, J. Abrahão, M.L. Assine // *Perspectives in Ecology and Conservation*. – 2019. – V. 17. – P. 1–9.
  7. Zarczynski M., Wacnik A., Tylmann W. Tracing lake mixing and oxygenation regime using the Fe/Mn ratio in varved sediments: 2000 year-long record of human-induced changes from Lake Zabinskie (NE Poland) // *Science Total Environment*. – 2019. – V. 657. – P. 585–596.
  8. Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation // *The Handbook of Environmental Chemistry*. – 2018. – V. 82. – P. 49–66.
  9. Postglacial sedimentation in the White Sea (northwestern Russia) reconstructed by integrated microfossil and geochemical data / D.F. Budko, L.L. Demina, E.A. Novichkova, Y.I. Polyakova, M.D. Kravchishina, V.N. Melenevsky // *Quaternary research*. – 2020. – V. 93. – № 1. – P. 110–123
  10. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego / V.D. Strakhovenko, D. Subetto, E.A. Ovdina, I.V. Danilenko, N. Belkina, N. Efrementko, A. Maslov // *Journal of Great Lakes Research*. – 2020. – V. 46. – № 3. – P. 443–455.
  11. Сысо А.И. Закономерности распределения химических элементов в почвообразующих породах и почвах Западной Сибири. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 277 с.
  12. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1976. – 268 с.
  13. Piper D., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions // *American Journal of Analytical Chemistry*. – 2013. – V. 4. – № 10. – P. 69–83.
  14. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited / B. Germain, S. Toucanne, Ch. Skonieczny, L. Andre, S. Bermell, S. Cheron, B. Dennielou, J. Etoubleau, N. Freslon, T. Gauchery, Y. Germain, S. Jorry, G. Ménot, L. Monin, E. Ponzevera, M.L. Rouget, K. Tachikawa, J.-A. Barrat // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2015. – V. 170. – P. 17–38.
  15. Чудаева В.А., Чудаев О.В. Поведение редкоземельных элементов при смешивании различных типов воды (Кунашир, Курильские острова) // *Тихоокеанская геология*. – 2010. – Т. 4. – № 2. – С. 171–186.
  16. Шатров В.А. Лантаноиды как индикаторы обстановок образования меловых фосфоритов (на примере Восточно-Европейской платформы) // *Доклады Академии наук*. – 2007. – Т. 414. – № 1. – С. 90–92.
  17. Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких земель и Th во взвеси и донных осадках устьевых зон разных категорий/классов рек мира и ряда крупных рек Российской Арктики // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 1. – P. 59–78.
  18. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Недра, 2006. – 360 с.
  19. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Low land across a 1700 km latitudinal gradient / V.P. Shevchenko, O.S. Pokrovsky, S.N. Vorobyev, I.V. Krickov, R.M. Manasypov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Yv. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2017. – V. 21. – P. 5725–5746.
  20. Савенко В.С. О соотношении биогенной и терригенной взвеси в океане // *Доклады Акад. наук*. – 1999. – Т. 364. – № 2. – С. 251–254.
  21. Обь-Ситительная записка к карте четвертичных отложений. Масштаб 1:200000. Серия Кулундинско-Барабинская. Лист: N-44-I. – Новосибирск: Западно-Сибирское книжное изд-во, 1967. – 88 с.
  22. Савченко Н.В. Гидрохимическое состояние озер низменных равнин Северной Евразии (на примере Западной Сибири). – Новосибирск: Деп. в ВИНТИ, 2004. – № 1266. – 364 с.
  23. Взаимосвязь химического состава органического вещества озерных систем и генезиса сапропелей / О.П. Таран, В.В. Болтенков, Н.И. Ермолаева, Е.Ю. Зарубина, И.В. Делий, Р.Е. Романов, В.Д. Страховенко // *Геохимия*. – 2018. – № 3. – С. 61–70.
  24. Генезис органоминеральных отложений озер центральной части Барабинской низменности (юг Западной Сибири) / В.Д. Страховенко, Е.А. Овдина, Г.И. Малов, Н.И. Ермолаева, Е.Ю., Зарубина, О.П. Таран, В.В. Болтенков // *Геология и геофизика*. – 2019. – Т. 60. – № 9. – С. 1231–1243.
  25. Зарубина Е.Ю., Соколова М.И. Роль зональных факторов в формировании продуктивности малых озер юга Обь-Иртышского междуречья // *Озера Евразии: проблемы и пути их решения: Матер. II Международной конференции*. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2019. – Ч. 1. – С. 80–84.
  26. Особенности химического состава озерных вод и формирующихся из них разнотипных сапропелей на юге Западной Сибири / В.Д. Страховенко, Е.А. Овдина, Н.И. Ермолаева, Е.Ю. Зарубина, А.В. Салтыков // *Водные ресурсы: новые вызовы и пути решения: Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием*. – Новочеркасск: Лик, 2017. – С. 426–431.
  27. Тейлор С.Р., Мак-Леннон С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. – М.: Мир, 1988. – 384 с.
  28. Шатров В.А., Войцеховский Г.В. К проблеме поведения лантаноидов в водах и осадочных образованиях современного мирового океана // *Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология*. – 2010. – № 3. – С. 73–83.
  29. Шевченко В.П., Маслов А.И., Штайн Р. Распределение ряда редких и рассеянных элементов в осадочном материале, переносимом дрейфующими льдами в районе плато Ермак, Северный Ледовитый океан // *Океанология*. – 2017. – Т. 57. – № 6. – С. 949–959.

Поступила 13.10.2021 г.

#### Информация об авторах

**Страховенко В.Д.**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий сотрудник лаборатории геохимии редких и благородных элементов Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С.

**Овдина Е.А.**, научный сотрудник лаборатории геохимии редких и благородных элементов Институт геологии и минералогии им. Соболева В.С.

UDC (550.42:546.65):551.312(571.1/5)

## FEATURES OF DISTRIBUTION OF RARE EARTH ELEMENTS IN THE WATERS AND BOTTOM SEDIMENTS OF SMALL LAKES OF THE BARABINSK LOWLAND AND THE KULUNDINSKY PLAIN

Vera D. Strakhovenko<sup>1</sup>,  
strahova@igm.nsc.ru

Ekaterina A. Ovdina<sup>1</sup>,  
ovdina@igm.nsc.ru

<sup>1</sup> V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS,  
3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

**The relevance** of the study is caused by the need to increase the raw material base of sapropel raw materials in the Siberian region. In the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain, drainless lakes strongly predominate, among which the dominant position is occupied by small reservoirs (97,5 %) with sapropel deposits at the bottom. This is due to the presence of a peculiar mountain relief for these territories, which is genetically associated with suffusion-deflation processes. Taken into account the diversity of lakes, it is important to study the factors that determine the geochemical composition of the resulting sapropels.

**The main aim** of the research is to determine the geochemical features of REE migration and fractionation in the waters and bottom sediments of the small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain and, based on the study of lanthanides, to reconstruct the main sources of the substance entering the emerging sapropel deposits.

**Objects:** waters and organomineral deposits of small lakes of the Barabinsk lowland and the Kulundinsky plain. REE distribution in the components of lake systems in the south of Western Siberia is poorly studied, especially in the waters.

**Methods.** Field methods – bottom sediment core, waters were sampled from the catamaran according to standard methods using a cylindrical sampler with a vacuum gate designed by NPO Typhun, Russia (diameter 82 mm, length 120 cm) and a 1-liter bathometer. All variable physical and chemical parameters of water and bottom sediments were determined in the field. The entire volume of water was filtered by vacuum filtration using filters with a pore diameter of 0,45 microns. Analytical methods – water samples were analyzed for macro- and microelements in the Primorsky Center for Local Elemental and Isotope Analysis of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences and the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS, Novosibirsk. The main cations and anions were determined by liquid ion chromatography (HPLC-10AVp, SHIMADZU), and organic carbon was determined by IR detection on a TOC – V analyzer (Shimadzu, Japan). Trace elements were determined by the inductively coupled plasma method (ICP-MS Agilent 7500 and 7500c) (analyst E.V. Elovsky) and by the atomic absorption method of IGM SB RAS (analyst L.N. Bukreeva). The morphology and phase composition of sediment samples of various classes were studied using a scanning electron microscope (SEM) TESCAN MIRA 3 (Tescan, Czech Republic) equipped with an energy spectrometer «OXFORD XMAX 450+» (Oxford Instruments, UK). The REE content was determined in 112 samples of bottom sediments by the ICP-MS method.

**Results.** The application of a unique methodological approach, expressed in modern biogeochemical, mineralogical, geochemical studies of a single lake in close relationship with the entire system of compactly located lakes (lake system) on the carefully selected lake systems: Barabinskaya, Kuibyshevskaya (Baraba) and Tanatarskaya, Petukhovskaya (Kulunda), gave an idea of the relationship of the modern formation of the composition of bottom sediments with the biogeochemistry of lake waters, with the composition of soils and soil-forming rocks of the catchment areas of the lake, the chemical composition of the autochthonous biota and the landscape conditions. The use of modern analytical methods allowed us to estimate the levels of concentrations and patterns of distribution of rare earth elements in the waters and bottom sediments of lakes from different landscape zones with different geochemical types of water (from ultra-fresh to brine) and sapropel class (silica, calcium, mixed with different genetic types).

### Key words:

Small lakes of the south of Western Siberia, geochemistry, mineralogy, rare earth elements, water, bottom sediments.

The research was carried out within the framework of the State assignment IGM SB RAS and financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### REFERENCES

1. Strakhov N.M. *Izbrannye Trudy. Osadkoobrazovanie v sovremennykh vodoemakh*. [Selected Works. Sedimentation in modern reservoirs]. Moscow, Nauka Publ., 1993. 396 p.
2. Savenko A.V., Savenko V.S., Pokrovsky O.S. New data on the concentrations of dissolved trace elements in waters of Russian Arctic rivers. *Doklady Earth Sciences*, 2020, vol. 491, P. 2, pp. 257–263.
3. Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Politova N.V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White sea. *Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 472, no. 2, pp. 331–571.
4. Apolinarska K., Pleskot K., Pelechata A., Migdalek M., Siepak M., Pelechaty M. The recent deposition of laminated sediments in highly eutrophic Lake Kierskie, western Poland: 1 year pilot study of limnological monitoring and sediment traps. *J. Paleolimnology*, 2020, vol. 63, pp. 283–304.
5. Budko D.F., Demina L.L., Lisitzin A.P. The heavy metal partitioning in the particle flux of the subarctic White Sea (Northwestern Russia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, vol. 249, 107063.
6. Guerreiro R.L., Bergier Iv., McGlue M., Warren L.V., Gomes Pinto de Abreu U., Abrahão J., Assine M.L. The soda lakes of Nhecolândia: a conservation opportunity for the Pantanal wetlands. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 2019, vol. 17, pp. 1–9.
7. Zarczynski M., Wacnik A., Tylmann W. Tracing lake mixing and oxygenation regime using the Fe/Mn ratio in varved sediments:

- 2000 year-long record of human-induced changes from Lake Zabinskie (NE Poland). *Science Total Environment*, 2019, vol. 657, pp. 585–596.
8. Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A., Lisitsyn A.P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 2018, vol. 49–66.
  9. Budko D.F., Demina L.L., Novichkova E.A., Polyakova Y.I., Kravchishina M.D., Melenevsky V.N. Postglacial sedimentation in the White Sea (northwestern Russia) reconstructed by integrated microfossil and geochemical data. *Quaternary Research*, 2020, vol. 93, no. 1, pp. 110–123
  10. Strakhovenko V.D., Subetto D., Ovdina E.A., Danilenko I.V., Belkina N., Efremenko N., Maslov A. Mineralogical and geochemical composition of Late Holocene bottom sediments of Lake Onego. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, vol. 46, no. 3, pp. 443–455.
  11. Syso A.I. Zakonomernosti raspredeleniya khimicheskikh elementov v pochvoobrazuyushchikh porodakh i pochvakh Zapadnoy Sibiri [Regularities of distribution of chemical elements in soil-forming rocks and soils of Western Siberia]. Novosibirsk, SB RAS Publ. House, 2007. 277 p
  12. Balashov, Yu.A. *Geokhimiya redkikh elementov* [Geochemistry of rare earth elements]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 268 p.
  13. Piper D., Bau M. Normalized rare earth elements in water, sediments, and wine: identifying sources and environmental redox conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*, 2013, vol. 4, no. 10, pp. 69–83.
  14. Germain B., Toucanne S., Skonieczny C., Andre L., Bermell S., Cheron S., Dennielou B., Etoubleau J., Freslon N., Gauchery T., Germain Y., Jorry S., Ménot G., Monin L., Ponzevera E., Rouget M.L., Tachikawa K., Barrat J.-A. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 170, pp. 17–38.
  15. Chudaeva V.A., Chudaev O.V. Behavior of rare earth elements during mixing of different types of water (Kunashir, the Kurile Islands). *Russian Journal of Pacific Geology*, 2010, vol. 4, no. 2, pp. 171–186. In Rus.
  16. Shatrov V. A. Lanthanides as indicators of the conditions of Cretaceous phosphorite formation (on the example of the East European Platform). *Reports of the Academy of Sciences*, 2007, vol. 414, no. 1, pp. 90–92. In Rus.
  17. Maslov A.V., Shevchenko V.P. REE–Th systematics of the suspended particulate matter and bottom sediments from the mouth zones of the world rivers of different categories/classes and some large Russian arctic rivers. *Geochemistry International*, 2019, vol. 59, no. 1, pp. 56–73.
  18. Dubinin, A.V. *Geokhimiya redkikh elementov v okeane* [Geochemistry of rare earth elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 360 p.
  19. Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Yv., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Low land across a 700 km latitudinal gradient. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, vol. 21, pp. 5725–5746.
  20. Savenko V.S. On the ratio of biogenic and terrigenous suspension in the ocean. *Reports of the Academy of Sciences*, 1999, vol. 364, no. 2, pp. 251–254. In Rus.
  21. *Obysnitel'nay zapiska k karte chetvertichnykh otlozheniy. Masshtab 1:200000. Seriya Kulundinsko-Barabinskay. List: N-44-I* [Explanatory note to the map of Quaternary deposits. Scale 1:200000. Kulundinsko-Barabinskaya series. Sheet: N-44-I]. Novosibirsk, Zapadno-Sibirskoe knizhnoe izdatelstvo, 1967. 88 p.
  22. Savchenko N.V. *Gidrokhimicheskoe sostoyaniye ozer nizmennykh ravnin Severnoy Evrazii (na primere Zapadnoy Sibiri)* [Hydrochemical state of lakes of lowland plains of Northern Eurasia (on the example of Western Siberia)]. Novosibirsk, Dep. v VINITI, 2004. No. 1266. 364 p.
  23. Taran O.P., Boltenkov V.V., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Delii I.V., Romanov R.E., Strakhovenko V.D. Relations between the Chemical Composition of Organic Matter in Lacustrine Ecosystems and the Genesis of Their Sapropel. *Geochemistry International*, 2018, vol. 56, Iss. 3, pp. 256–265. DOI: 10.1134/S0016702918030096
  24. Strakhovenko, V.D., Ovdina, E.A., Malov, G.I., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Y., Taran, O.P., Boltenkov, V.V. Genesis of organomineral deposits in lakes of the central part of the Baraba lowland (South of West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 9, pp. 1231–1243.
  25. Zarubina E.Yu., Sokolova M.I. Rol zonalnykh faktorov v formirovaniy produktivnosti malykh ozer uga Ob-Irtyshskogo mezhdurechiya [The role of zonal factors in the formation of productivity of small lakes in the south of the Ob-Irtysh interfluve]. *Ozera Evrazii: problemy i puti resheniy. Materialy 2 mezhdunarodnoy konferentsii* [Lakes of Eurasia: problems and ways of their solution. Proc. II International Conference]. Kazan, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan Publ. House, 2019. P. 1, pp. 80–84.
  26. Strakhovenko V.D., Ovdina E.A., Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Saltykov A.V. Osobennosti khimicheskogo sostava ozernykh vod i formiruyushikhsya iz nikh raznotipnykh sapropeley na yuge Zapadnoy Sibiri [Features of the chemical composition of lake waters and different types of sapropels formed from them in the South of Western Siberia]. *Vodnye resursy: novye vyzovy i puti resheniy. Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Collection of scientific papers of the All-Russian Scientific Conference with International Participation. Water resources: new challenges and solutions]. Novosibirsk, Lik Publ., 2017. pp. 426–431.
  27. Taylor S.R., McLennon S.M. *Kontenentalnaya kora: sostav i ivalutsiya* [The continental crust: its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 1988. 384 p.
  28. Shatrov V.A., Voitsekhovskiy G.V. On the problem of the behavior of lanthanides in the waters and sedimentary formations of the modern world ocean. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2010, no. 3, pp. 73–83. In Rus.
  29. Shevchenko V.P., Maslov A.V., Stein R. Distribution of some rare and trace elements in ice-rafted sediments in the Yermak plateau area, the Arctic ocean, *Oceanology*, 2017, vol. 57, no. 6, pp. 855–863.

Received: 13 October 2021.

#### Information about the authors

**Vera D. Strakhovenko**, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.  
**Ekaterina A. Ovdina**, researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS.