



УДК 556.55:546.791.2

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В КОМПОНЕНТАХ ОЗЕРНЫХ СИСТЕМ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СТЕПНОМ ЛАНДШАФТЕ ЮГА СИБИРИ (КУЛУНДИНСКАЯ И ТАЖЕРАНСКАЯ СТЕПЬ)

В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, Г. И. Малов

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследованы малые озера, расположенные компактно на небольших территориях в степном ландшафте разных районов Сибири. Выявлены высокие содержания урана в водах озер гидрокарбонатно-натриевого состава с высокой щелочностью, а также повышенные его концентрации в донных отложениях некоторых озер. Установлено, что в данных озерах на фоне преобладающей терригенной фракции (кварц, полевые шпаты) в результате хемогенных и биогенных процессов осаждаются карбонаты при участии углекислого газа, который формируется за счет бактериальной деструкции органического вещества. Показано, что в донных отложениях преобладают карбонаты кальцит-доломитового ряда и за счет деструкции органического вещества создаются восстановительные условия. При кристаллизации карбонатов происходит сорбция урана вновь образованными минералами.

**Ключевые слова:** озера, геохимия, минералогия, уран, сухостепной ландшафт.

## FEATURES OF THE URANIUM DISTRIBUTION IN THE COMPONENTS OF LAKE SYSTEMS LOCATED IN THE STEPPE LANDSCAPE OF SOUTH SIBERIA (KULUNDA AND TAZHERANY STEPPE)

V. D. Strakhovenko, E. A. Ovdina, G. I. Malov

V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Small lakes located compactly on small territories in the steppe landscape of different regions of Siberia have been studied. High uranium contents in waters of lakes of sodium bicarbonate composition with high alkalinity, as well as increased concentrations of uranium in the bottom sediments of some lakes were revealed. It has been determined that carbonates are deposited in these lakes against the background of the predominant terrigenous fraction (quartz, feldspars) as a result of chemogenic and biogenic processes with the participation of carbon dioxide gas, which is formed due to the bacterial destruction of organic matter. Calcite-dolomite carbonates are shown to be predominated in the bottom sediments, and reducing conditions are created due to the destruction of organic matter. During the carbonate crystallization the U sorption occurs by newly formed minerals.

**Keywords:** lakes, geochemistry, mineralogy, uranium, dry steppe landscape.

DOI 10.20403/2078-0575-2022-2-88-99

Изучение современной седиментации в озерах важно для понимания закономерностей процессов континентального осадконакопления и установления индикаторных особенностей новообразованных минералов. Анализ литературы, посвященной вопросам континентального седиментогенеза [4, 18, 20], показал, что большинство работ опирается в основном на данные изучения главных компонентов и абсолютный приоритет отдается исследованиям крупных озер. Например, особый интерес вызывает минералообразование в результате биогеохимических процессов превращения вещества взвеси в водах в донные отложения (ДО) с образованием аутигенных минералов с переменными валентными элементами, которые могут служить индикаторами условий генезиса [1, 8, 24, 25].

Исследование отдельно взятого озера в системе компактно расположенных озер в одинаковых ландшафтно-климатических, геолого-геохимических условиях и их сравнительный анализ позволяют оценить эволюцию природных вод, ДО и факторы, определяющие их геохимическую специфику. Накопление микроэлементов в водах озер может

происходить за счет процессов их выщелачивания из горных пород поверхностными и/или подземными водами. Согласно исследованиям геологических партий «Березовгеология» и «Волковгеология», урановое гидрогенное оруденение как приурочено к границе выклинивания региональной зоны пластового окисления, так и локализуется в палеорусловых структурах в рыхлых отложениях Западно-Сибирской плиты [2]. На юге региона в глинистых и песчано-глинистых отложениях неогена и верхнего палеогена Кулундинской впадины на небольшой глубине фиксируются ураноносные зоны с содержанием U 0,01–0,06 %. Рудоносны аллювиальные отложения дельтовой фации – сероцветные окисленные пески, алевриты и лигниты. Так, например, в Рубцовском рудном узле выявлена целая сеть палеодолин базального типа с ураноносными зонами, врезанных в высокорadioактивные граниты фундамента. К ним приурочены месторождения урана с урановыми залежами в базальной части палеорусла. Палеодолины выполнены аллювиальными отложениями верхнеолигоцен-нижнемиоценового возраста и перекрыты глинистыми породами верх-



него неогена. В них имеются признаки урановой гидрогенной минерализации в связи с выклиниванием зон окисления. Осложняющий фактор – перехват различных инфильтрационных потоков эрозионно-тектоническими котловинами многочисленных озер, опоясывающих складчатую область [2].

Некоторые авторы связывают химическое осаждение U в процессе седиментогенеза с его восстановлением ниже границы зоны кислородного насыщения [13]. В то же время в ряде научных статей зарубежных авторов показано, что подвижность форм урана определяется не только окислительно-восстановительными условиями и pH вод, но и биогеохимическими процессами (т. е. наличием органического вещества и его взаимодействием с гидроксидами железа и марганца) [29 и др.]. Окислительно-восстановительный потенциал пары  $U^{4+}/U^{6+}$  таков, что оксиды  $Mn^{(3+/4+)}$  и  $Fe^{3+}$  должны быть эффективными ее окислителями. Сорбция урановых комплексов на гидроокислах железа сильно уменьшается в присутствии органического вещества и/или конкурирующих катионов, таких как  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  [22]. Другими исследователями определено, что в результате бактериальных процессов резко уменьшается концентрация  $U^{4+}$  в водной фазе за счет образования нерастворимых соединений  $U^{4+}$  [24, 30]. Установлено, что  $U^{4+}$  в геологической среде формирует молекулярные комплексы, которые связаны с биомассой [25, 31]. Особенно это актуально для содовых озер, имеющих стабильно высокий pH (около 9 и выше) и расположенных в криоаридном климате на территории Сибири. В этих озерах развиваются экстремофильные альгоценозы, кислородными продуцентами которых служат цианобактерии и водоросли [5].

Цель работы – на основе биогеохимических и гидрогеохимических исследований выявить концентрации урана в компонентах малых озерных систем, расположенных в степной зоне юга Сибири, и оценить главные факторы концентрирования в них урана.

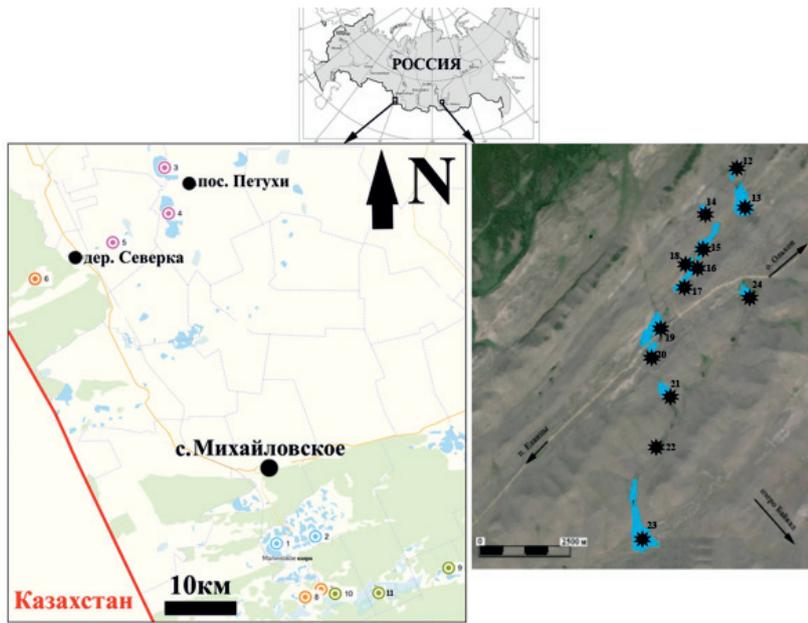
В основу исследования положены материалы, собранные в течение 2005–2020 гг. ДО отобраны с катамарана пробоотборником с цилиндрическим вакуумным затвором на глубине до 2 м. На месте отбора проводился оперативный анализ нестабильных параметров воды: показателей pH, общей минерализации воды с помощью портативного анализатора жидкости серии «АНИОН-7000». Потенциометрическим методом определяли pH (предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения – ед.  $pH \pm 0,02$ ). Кондуктометрическим методом определяли общую минерализацию воды (предел допускаемой основной относительной погрешности измерения в пересчете на хлористый натрий  $\pm 3\%$ , но не менее значения нижнего предела диапазона измерения). Содержание  $O_2$  измеряли методом определения биохимического потребления кислорода (в мг/л) за пять суток (БПК5) (при

температуре 20 °С). Определение БПК5 проводилось сотрудниками ИВЭП СО РАН в первоначальной пробе по разности между содержанием кислорода до и после инкубации в течение пяти суток без доступа кислорода и света.

Керн ДО изучался послойно. Макро- и микро-элементный состав озерных вод, почв и ДО определялся методом атомной абсорбции (спектрометр «Solaar M6», Thermo Electron, США, снабженный зеемановским и дейтериевым корректором фона; аналитики Л. Д. Иванова, Л. Н. Букреева, О. А. Савина). Контроль правильности осуществлялся методом добавок и по государственным стандартным образцам. Элементный анализ образцов (донных отложений, воды, почв) выполнен методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре высокого разрешения «ELEMENT» (Finnigan MAT, США) с пневматическим концентрическим распылителем Майнхарда (аналитики И. В. Николаева, С. В. Палесский). Фильтраты воды были также проанализированы на макро- и микроэлементы в Приморском центре локального элементного и изотопного анализа ДВГИ ДВО РАН (Владивосток) и ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (Новосибирск) (47 проб). Основные катионы и анионы определялись методом жидкостной ионной хроматографии на анализаторе «HPLC-10AVp» (Shimadzu, Япония), а органический углерод – методом ИК-детектирования на анализаторе «TOC-V» (Shimadzu, Япония). Определение содержания РЗЭ в водных средах выполнено с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500 (Agilent Technologies, США) в ДВГИ ДВО РАН (аналитик Е. В. Еловский). Измерения проводили методом градуировочного графика с использованием мультиэлементного стандартного образца Multi-Element Calibration Standard-1 (Agilent Technologies, США), из которого весовым методом готовились следующие калибровочные точки: 50, 100, 500 ppt; 1, 5, 10, 50, 100, 500 ppb. Предел определения (15s) редкоземельных элементов следующий (ppm): Ce 18; La, Nd 13; Sm 7; Gd, Dy 5; Pr 4; Er, Yb 2; Eu, Tb, Ho, Tm, Lu 1. Ошибка измерения всех РЗЭ не более 5 % RSD.

Минеральный состав ДО изучался методами рентгеновской дифрактометрии (XRD). Исследование морфологии, фазового и химического состава ДО проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ). Для выявления генезиса сапропеля, формирующегося в разных озерах, отобраны пробы первичного сапропелеобразующего материала (фитопланктон, фотосинтетические пигменты, зоопланктон, фитобентос и фитоперифитон, макрофиты, укосы на биомассу, геоботанические описания). Образцы доминирующих видов растений изучены концентрированием в них микроэлементов.

Объекты исследования – озера Малиновое, Каратан, Танатар 4, Танатар 6, Рублево, Демкино, Пресное, Петухово у д. Северка, Петухово у пос. Пе-



**Рис. 1.** Схема расположения озер Кулундинской равнины

1 – Малиновое; 2 – Каратан; 3 – Петухово (пос. Петухи); 4 – Куричье; 5 – Желтырь; 6 – Петухово (д. Северка) (бор); 7 – Танатар-4; 8 – Танатар-6; 9 – Пресное; 10 – Демкино; 11 – Рублево и Тажеранской степи (Прибайкалье); 12 – Хара-Нур; 13 – Гызги-Нур; 14 – Круглое; 15 – Нуху-Нур; 16 – Гурби-Нур; 17 – Матовое; 18 – Скалистое; 19 – Холбо-Нур; 20 – Шалар-Нур; 21 – Цаган-Тырма; 22 – Мелкое; 23 – Намши-Нур; 24 – Придорожное

тухи, Желтырь, Куричье и др., расположенные на территории Кулундинской степи и озера Тажеранской системы (Круглое, Хара-Нур, Гызги-Нур, Холбо-Нур, Нуху-Нур, Гурби-Нур, Скалистое, Шалар-Нур, Намши-Нур, Придорожное, Цаган-тырма) и др. (Прибайкалье) (рис. 1).

Исследования по геохимии и минералогии ДО и вод Тажеранских озер опубликованы в серии научных статей, в том числе и нами [1, 6, 11]. Выявленное разнообразие геохимии озерных вод связано с процессами трансформации поступающих в озера подземных вод с формированием содовых и содово-сульфатных вод. ДО сложены обломочной фракцией (полевые шпаты, кварц и биотит, их состав отвечает составу минералов горных пород площадей водосбора), аутигенными карбонатами различного состава и рентгеноаморфным органическим веществом [1].

Исследователи разных лет детально изучали воды озер Кулундинской степи. Одни авторы выявили взаимосвязь между химическим составом природных вод (грунтовыми, поверхностными), типами почв и генезисом солей в озерах и почвах региона [7, 10, 12]. Отмечается, что к зонам распространения подзолистых (боровых) почв, которые расположены на песчаных террасах и днищах ложбин древнего стока, приурочены карбонатные воды, с преобладанием бикарбонатов Na. В зонах распространения черноземов и каштановых почв чаще всего ожидаемы озера с сульфатными и сульфатно-хлоридными водами, для которых характерно отсутствие соды [12]. Другими авторами установлено отсутствие четких корреляций между географической зональностью и зональностью вод озер Кулундинской степи. Они утверждают, что генезис солей в озерах определяется главным образом характером подземных вод [19]. Полученные нами данные по химическому составу вод озер изучаемой территории показали, что к зонам рас-

пространения подзолистых почв приурочены карбонатные воды с преобладанием бикарбонатов натрия, к зонам распространения лугово-степных солонцеватых почв – озера с сульфатно-бикарбонатными и сульфатно-хлоридными водами. Установлено отсутствие четких корреляций между географической зональностью и зональностью вод озер Кулундинской степи [14].

### Полученные результаты

Ранее в водах части изученных озер авторами выявлены высокие концентрации урана [1, 15, 17]. Аналитические данные по химическому составу вод, содержанию U в воде, ДО и почвах водосборных площадей озер Тажеранской и Кулундинской степи приведены в таблице.

Согласно данным анализов XRD и СЭМ установлено, что в составе донных отложений озер Кулундинской степи присутствуют минералы обломочной (кварц, полевые шпаты, слюды, хлорит) и аутигенной (различные карбонаты, аморфный кремнезем, пирит) фракций.

В данных озерах преобладают биохемогенные процессы осаждения карбонатов при участии углекислого газа, который формируется за счет бактериальной деструкции органического вещества, а также карбонатов биохемогенного генезиса [16, 17].

Статистическая обработка массива аналитических данных показала возможность сравнения выборок. В основном выборки имеют либо нормальное, либо логнормальное распределение изученных элементов. На основе аналитических данных проведен кластерный анализ, посчитаны парные коэффициенты корреляции между макро- и микроэлементами в ДО и воде, РЗЭ и другими элементами в составе изучаемых донных отложений и почв водосборных площадей.

Высокие коэффициенты корреляции между содержанием U в озерных водах и с суммой  $CO_3$ ,



Химический состав вод и значения концентраций урана в воде (В), донных отложениях (ДО) и почве (П) малых озер

Озеро	М, г/л	Формула Курлова	Состав воды	pH	U (В), мг/л	U (ДО), г/т	U (П), г/т
<i>Кулундинская степь</i>							
Малиновое	396	<u>Cl 85 [SO4 14]</u> Na 94 [Mg 6]	Хлоридная натриевая	7,8	0,025	3,9	2,1
Каратан	15,2	<u>Cl 50 SO4 32 HCO3 18</u> Na 99	Гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридная натриевая	9,5	0,04	41,7	2,5
Петухово (Петухово)	54,2	<u>Cl 77 [SO4 22]</u> Na 70 Mg 30	Хлоридная магниевое-натриевая, рассол	7,9	0,031	18,3	2,1
Куричье	67,0	<u>Cl 76 [SO4 23]</u> Na 69 Mg 28	Хлоридная магниевое-натриевая, сильносоленая	8,2	0,032	8,6	1,5
Желтырь	19,8	<u>Cl 76 [SO4 23]</u> Na 69 Mg 28	Хлоридная магниевое-натриевая, сильносоленая	9,5	0,43	11,4	2,3
Петухово (Северка)	62,7	<u>HCO3 58 Cl 38</u> Na 99	Гидрокарбонатная натриевая, соленая	9,8	0,39	8,7	1,3
Танатар 4	2,4	<u>HCO3 82 Cl 15</u> Na 93Mg6	Гидрокарбонатная натриевая, соленая	9,5	0,01	3,1	2,2
Танатар 6	23,4	<u>Cl 50 HCO3 39 [SO4 11]</u> Na 100	Гидрокарбонатно-хлоридная натриевая, рассол	9,9	0,31	2,6	1,4
Пресное	0,7	<u>HCO3 63 Cl 24 [SO4 13]</u> Na 41 Ca 33 Mg 26	Хлоридно-гидрокарбонатная магниевое-кальциевое-натриевая, пресная	7	0,0003	5,3	2,9
Демкино	2,1	<u>HCO3 89 Cl 9</u> Na 66Mg30	Гидрокарбонатная магниевое-натриевая, соленая	8,95	0,0003	1,4	1,1
Рублево	2,6	<u>HCO3 94 Cl 5</u> Na 67Mg23	Гидрокарбонатная магниевое-натриевая, соленая	9,1	0,0002	1,1	1,0
<i>Тажеранская степь</i>							
Хара-Нур	0,5	<u>HCO3 76 [SO4 21]</u> Mg 48 Na 28 [Ca 24]	Гидрокарбонатная натриево-магниевая, пресная	8,3	0,27	7	1,1
Гызги-Нур	1,1	<u>HCO3 62 SO4 33 [Cl 5]</u> Mg 59 Na 35 [Ca 6]	Сульфатно-гидрокарбонатная натриево-магниевая, слабopрeсная	9,4	0,06	3	1,4
Круглое	1,4	<u>HCO3 88 [SO4 10]</u> Mg 72 [Na 24]	Гидрокарбонатная магниевая, слабopрeсная	9,6	0,04	1,7	1,2
Нуху-Нур	1,3	<u>HCO3 56 SO4 37 [Cl 6]</u> Mg 56 Na 36 [Ca 8]	Сульфатно-гидрокарбонатная натриево-магниевая, слабopрeсная	9,3	0,08	1,3	1,8
Гурбу-Нур	5,1	<u>SO4 60 HCO3 29 [Cl 11]</u> Na 59 Mg 40	Гидрокарбонатно-сульфатная магниевое-натриевая, сильносоленая	9,7	0,10	2,4	2,2
Матовое	5,2	<u>SO4 60 HCO3 29 [Cl 11]</u> Na 59 Mg 40	То же	10,4	0,08	9	2,2
Скалистое	3,9	<u>SO4 53 HCO3 36 [Cl 11]</u> Na 53 Mg 46	Гидрокарбонатно-сульфатная магниевое-натриевая, соленая	9,5	0,06	14	1,1
Холбо-Нур	5,6	<u>SO4 77 [Cl 15 HCO3 8]</u> Na 51 Mg 46	Сульфатная магниевое-натриевая, соленая	9,5	0,22	6	2,4
Шалар-Нур	6,3	<u>SO4 79 [Cl 15 HCO3 6]</u> Na 49 Mg 47	То же	9,3	0,20	11	2,3
Цаган-Тырм	20,0	<u>Cl 63 SO4 31 [HCO3 6]</u> Na 75 [Mg 24]	Сульфатно-хлоридная натриевая, сильносоленая	9,7	0,22	34	1,8
Мелкое	3,5	<u>SO4 70 [HCO3 21 Cl 9]</u> Mg 60 Na 39	Сульфатная натриево-магниевая, соленая	9,5	0,25	20	1,7
Намши-Нур	2,1	<u>HCO3 47 SO4 43 [Cl 9]</u> Na 53 Mg 44	Сульфатно-гидрокарбонатная магниевое-натриевая, слабopрeсная	9,6	0,24	17	2,8
Придорожное	9,5	<u>SO4 61 HCO3 31 [Cl 8]</u> Na 78 [Mg 22]	Гидрокарбонатно-сульфатная натриевая, сильносоленая	10,2	0,31	11	1,3

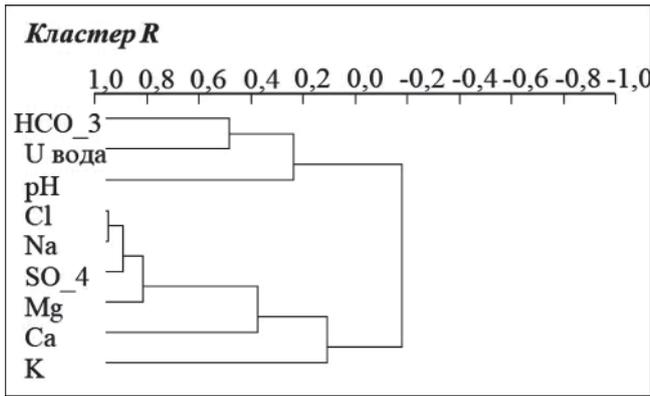


Рис. 2. Дендрограмма кластер-анализа R-типа содержания макроэлементов и урана в водах озер (44 пробы)

$\text{HCO}_3^-$ -ионов и pH раствора озерных вод подтвердило известный факт, что содовые щелочные воды озер способствуют накоплению урана в форме карбонатных комплексов уранил-иона, который образует легкорастворимые соединения (рис. 2).

В озерах воды с pH больше 8,5 благоприятствуют высокой подвижности уранил-карбонатных соединений натрия  $\text{Na}_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$ , которые становятся неустойчивыми при  $\text{pH} > 9,5$  с образованием плохо растворимых оксидов урана  $\text{Na}_4 \rightarrow [\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3] + 2\text{NaOHUO}_3 + 3\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . Сравнение концентраций урана в водах озер Каратан и Танатар 6 (Кулундинская степь), Скалистое и Холбо-Нур (Тажеранская степь) позволяет утверждать, что накопление урана в таких водах происходит только при высокой их метаморфизации. Соединения урана могут попадать в озеро в результате разгрузки подземных вод, и далее за счет испарения озерных вод в условиях аридного климата могут накапливаться до высоких концентраций.

Отсутствие же высокой положительной корреляции между содержанием урана в ДО и водах, ДО и почвах указывает на то, что накопление урана в ДО происходит в результате сочетания нескольких факторов: за счет его высоких концентраций в озерных водах (при высокой степени метаморфизации вод и резкой смене гидрогеохимического режима) и/или поступления почвенных частиц (частиц почвообразующего субстрата), терригенных минералов с высоким содержанием урана с водосборной площади (рис. 3).

В результате кластерного анализа R-типа, выполненного по аналитическим данным содержания элементов в ДО озер с разными концентрациями урана в них (от низких до высоких) (рис. 4, а), выделены три основные группы с отрицательным коэффициентом корреляции между ними. В первой представлены петрогенные элементы, составляющие терригенную часть ДО, и в основном все микроэлементы – клаустофилы. И именно в ней находится уран, имеющий тесную положительную связь с Th и PЗЭ. Это указывает на то, что уран в виде изоморфной примеси присутствует в акцессорных минералах. Изучение с использованием

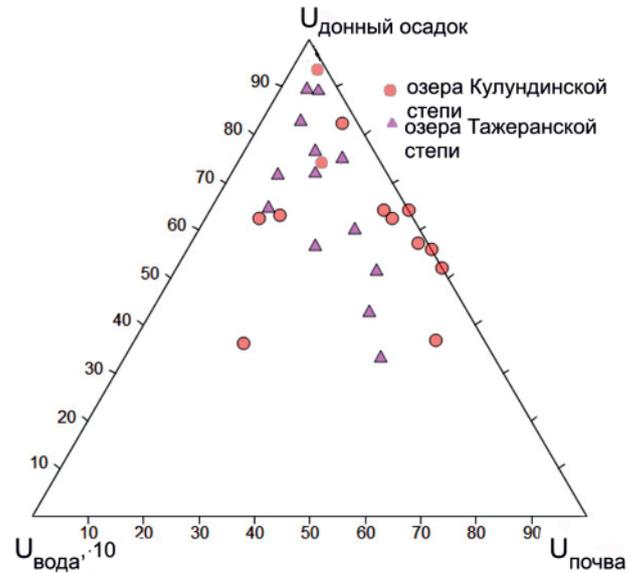
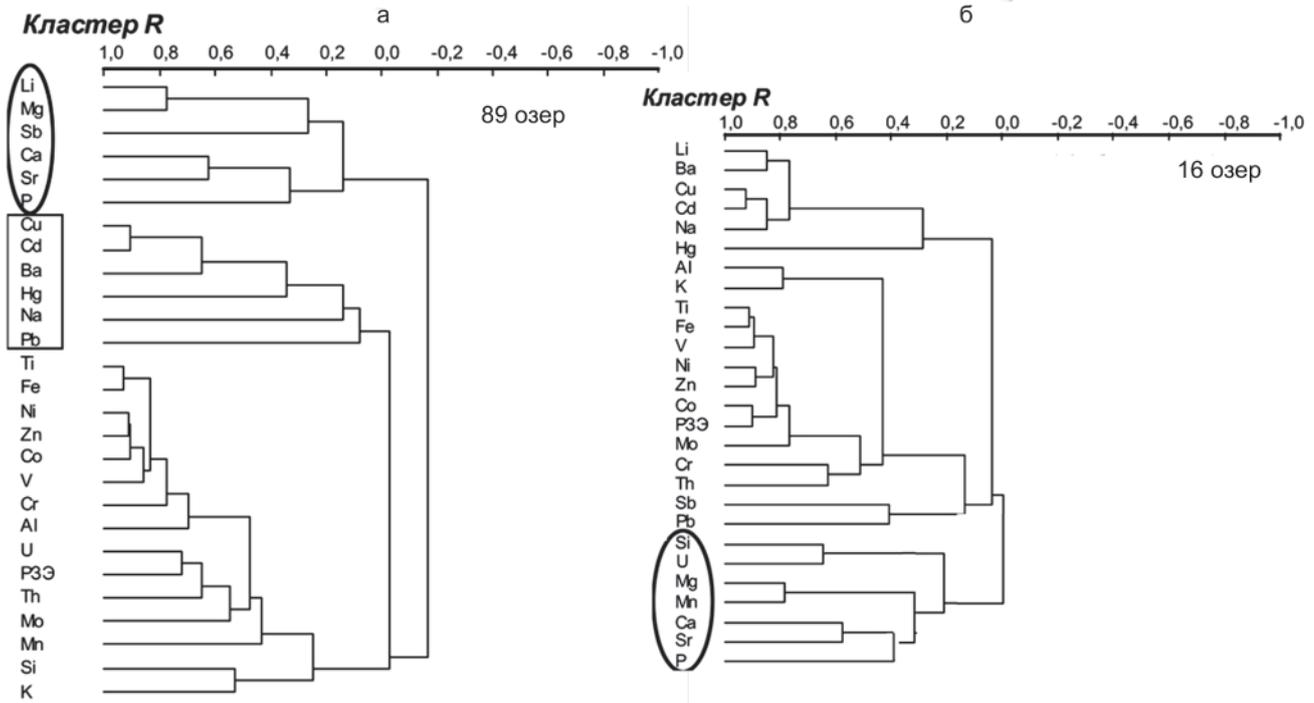


Рис. 3. Треугольник Ферре соотношения содержания урана в различных компонентах озерных систем. Концентрации урана (мг/л) в воде увеличены в 10 раз, концентрации урана в донных отложениях и почвах в мг/кг

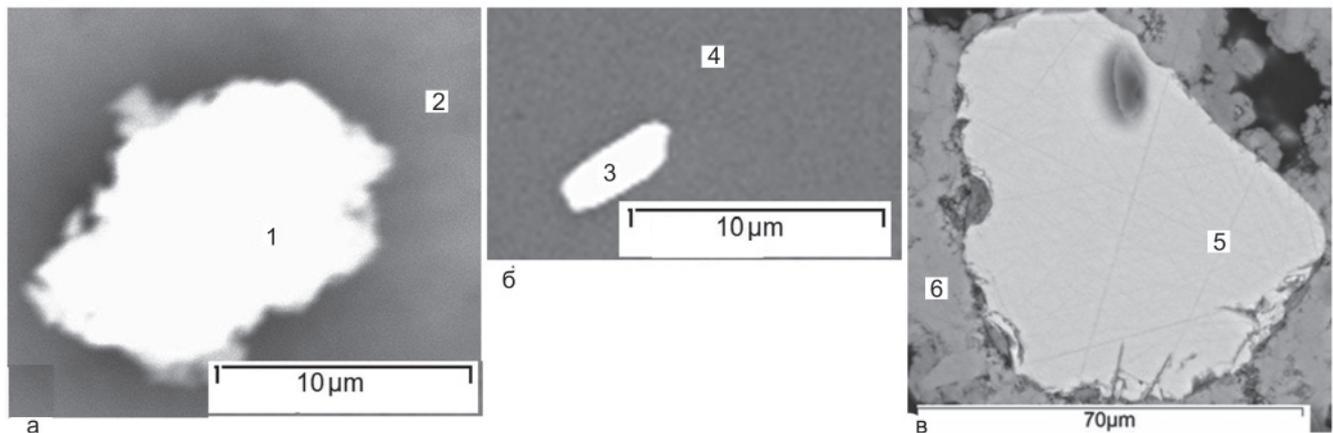
СЭМ подтвердило данное предположение: уран в виде изоморфной примеси выявлен в цирконе, апатите, монаците (рис. 5). Вторая группа Ca, Sr, Mg – карбонатофилы, с ними связаны Li, Sb, P. Скорее всего, присутствие фосфора в данной подгруппе указывает на биохемогенное образование карбонатов. Это также подтверждается изотопными характеристиками изученных карбонатов и органического вещества [27].

В третьей группе объединены Cu, Cd, Hg, Pb, Ba, Na, генезис ее неочевиден. С одной стороны, в ней отмечены Cu, Cd, Hg, Pb, обычно связанные с сорбцией органическим веществом. С другой стороны, Ba, Na в донных отложениях изучаемых озер присутствуют в составе полевых шпатов (обломочной фракции) и в минералах хемогенной фракции (барите, троне, галите, гейлюссите, соде, тенардите и некоторых других). В данном случае можно предположить участие микробактерий при осаждении различных солей – троны, гейлюссита, барита, соды.

В результате кластерного анализа R-типа, выполненного по аналитическим данным содержания элементов в ДО озер только с высокими концентрациями U ( $>10$  мкг/кг) (см. рис. 4, б), также выделены три основные группы с отрицательным коэффициентом корреляции между ними, очень схожие с предыдущими. Только U совместно с Si обособлены в отдельную подгруппу, которая связана положительной корреляцией со второй группой – карбонатной. Si в донных отложениях изученных озер на 25–60 % присутствует в виде биогенного кремнезема скелетов диатомовых и остатков макрофитов, а остальная часть (40–75 %) – в виде зерен кварца и силикатов обломочной фракции. Возможно, что U сорбируется органическим веществом и захоранивается в донных отложениях в результате обра-



**Рис. 4.** Дендрограмма кластер-анализа R-типа содержаний макро- и микроэлементов в донных отложениях озер, аналитические данные по озерам Кулундинской и Тажеранской степи: а – по всем 89, б – по 16 с высоким содержанием урана в донных отложениях



**Рис. 5.** Микрофотографии акцессорных минералов в донных отложениях озер Малиновое (а), Холбо-Нур (б) и Петухово (Северка) (в), выполненные с использованием СЭМ

1 – зерно циркона, с изоморфной примесью урана около 1,5 %; 2 – мелкокомковатый агрегат высокомагнезиального кальцита; 3 – зерно циркона, с изоморфной примесью урана около 2,5%; 4 – крупное зерно кварца; 5 – крупное зерно апатита, зерно циркона с изоморфной примесью урана около 2 %; 6 – зонально-концентрические агрегаты кальцита

стания обломков створок диатомей и остатков макрофитов изначально магнезитом, который трансформируется в процессе седиментогенеза в кальцит и/или доломит (рис. 6).

Выявлены главные факторы концентрирования урана в компонентах оз. Петухово (Северка), расположенного в ленточном бору на юге Кулундинской равнины. Напомним, что именно в глинистых и песчано-глинистых отложениях неогена и верхнего палеогена юга Кулундинской впадины на небольшой глубине фиксируются ураноносные зоны с содержанием урана 0,01–0,06 % [2]. Рудоносны аллювиальные отложения дельтовой фации – се-

роцветные и окисленные пески, алевроиты, глины и лигниты. Оз. Петухово расположено недалеко от ураноносной зоны. Судя по степени зарастания макрофитами и величине образуемой ими первичной продукции, в озере преобладает жесткая воздушно-водная растительность, продуцирующая от 259 до 1127 г/м<sup>2</sup> в год органического вещества при площади зарастания акватории не более 30 %. Вода озера является гидрокарбонатно-натриевым рассолом с общей минерализацией воды 52,3 г/л. Вдоль восточного берега озера под отложениями альго-бактериальных матов в толще прибрежного осадка обнаружены крупные (до десятков см<sup>2</sup>) об-



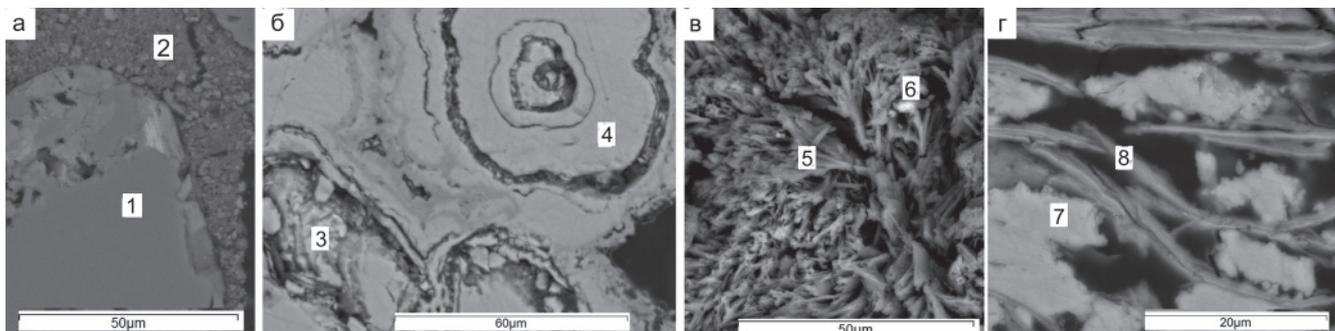
хово заложен профиль, глубиной 60 см (до воды) (рис. 7).

Согласно микроскопическому и рентгенофазовому изучению проб из горизонтов с разной глубины установлено, что верхние 5 см представлены уплотненным усохшим альго-бактериальным матом; далее до глубины 20 см – серо-зеленые илы с большим количеством мортмассы биоты и мелких зерен кальцита; затем слой 3 см (гл. 25–28 см) ярко-зеленых илов с черным горизонтом (мощностью до 1,5 см), в котором находится основная масса зерен кальцита (строматолит); слой 5 см илов (гл. 28–33 см) пятнистой окраски за счет образования черных и бурых пятен разной размерности (гидроокислы и окислы железа) на фоне серо-зеленой общей массы; слой илов 7 см (гл. 33–40 см) пятнистой окраски за счет образования белых и бурых пятен разной размерности на фоне серо-зеленой общей массы; самый нижний горизонт (40–60 см) слабо уплотненный со свободной водой, сложен зернами кварца и полевого шпата алевритовой и алевропелитовой размерности. Согласно данным рентгенофазового анализа и изучению проб с использованием СЭМ серо-зеленые илы сложены терригенными зернами кварца, полевых шпатов (калиевым полевым шпатом, олигоклазом, альбитом) и аутигенными агрегатами мелкозернистого кальцита, доломита, часто обрастающими зерна минералов обломочной фракции или остатки биоты (рис. 8, а). Найденные агрегаты кальцита и доломита (строматолит) имеют макроструктуру с хорошо различимыми по цвету и морфологии зерен слоями.

В различных агрегатах независимо от их размера (от 1 до 25 см) можно выделить от одного до нескольких чередований более темных и светлых слоев, имеющих разную морфологию и степень кристалличности (см рис. 8, б).

Сопоставлены усредненные концентрации всех изученных элементов в различных горизонтах донных отложений оз. Петухово, почвах площадей водосбора, биогенных матах, строматолите и в разрезе прибрежных осадков, в которых обнаружены агрегаты строматолита (рис. 9).

Выявленные более высокие концентрации U, Na, Mg, Al, Ca в самом верхнем горизонте разреза можно объяснить образованием тонких пленок на первичном скелете водорослей в виде псевдоморфоз по нитям и клеткам микроорганизмов, а также результатами концентрирования отдельных элементов живым веществом при создании специфических локальных Eh-pH условий в процессе фотосинтеза. Пленки состоят из мелкозернистой массы арагонита и/или кальцита, сульфатов и/или карбонатов магния, троны, доломита по мортмассе циано-альго-бактериального сообщества [26], а также (по данным рентгенофазового анализа) присутствием Na слюд в значительных количествах (см. рис. 8, в). Максимальные содержания U, V, Ba, Mo установлены в строматолите, на фоне резкого обеднения всеми другими элементами, за исключением Ca, Mg, Sr, входящих в состав кальцита и доломита, которые слагают разные зоны строматолита. Внутри агрегатов строматолита обнаружены нитевидные агрегаты циано-альго-бактериального сообщества с поверхности, покрытые пленками магнезита, что указывает на его биохемогенный генезис (см. рис. 8, г). Для большей части элементов карбонаты и органическая масса являются разубоживающей компонентой, однако уран и ванадий сорбируются органическим веществом при биохемогенном образовании карбонатов [1, 15, 17, 21]. Редкие мелкие отдельные зерна барита (<0,01 мм) встречаются в массе строматолита. Высокие концентрации U, Na, Mg, Al, Ca, Sr, Mo, V в донных отложениях озера, согласно исследованиям СЭМ и данным рентгеноструктурного анализа, связаны с доминированием в них доломита, кварца, олигоклаза, разупорядоченного смектита. Авторами в серии статей, опубликованных ранее [1, 17, 26], детально описан механизм образования магнезита в виде пленок на скелетном каркасе органического вещества и дальнейшая его трансформация в кальцит/низкомагнезиальный кальцит. Установлено, что в процессах осаждения карбонатов принимает участие углекислый газ, который формируется за счет бактериальной деструкции органического вещества. В результате анализа статей зарубежных



**Рис. 8.** Микрофотографии донных отложений (а) и агрегата строматолита (б, в, г) оз. Петухово (Северка) с использованием СЭМ

1 – зерно кварца в сростании с зернами полевых шпатов, слюды; 2 – мелкокомковатый агрегат доломита; 3 – зерна доломита; 4 – зонально-концентрические агрегаты кальцита; 5 – пластинчатые кристаллы троны; 6 – зерна магнезита; 7 – зерна кальцита; 8 – пластинчатые агрегаты циано-альго-бактериального сообщества, покрытые пленкой магнезита

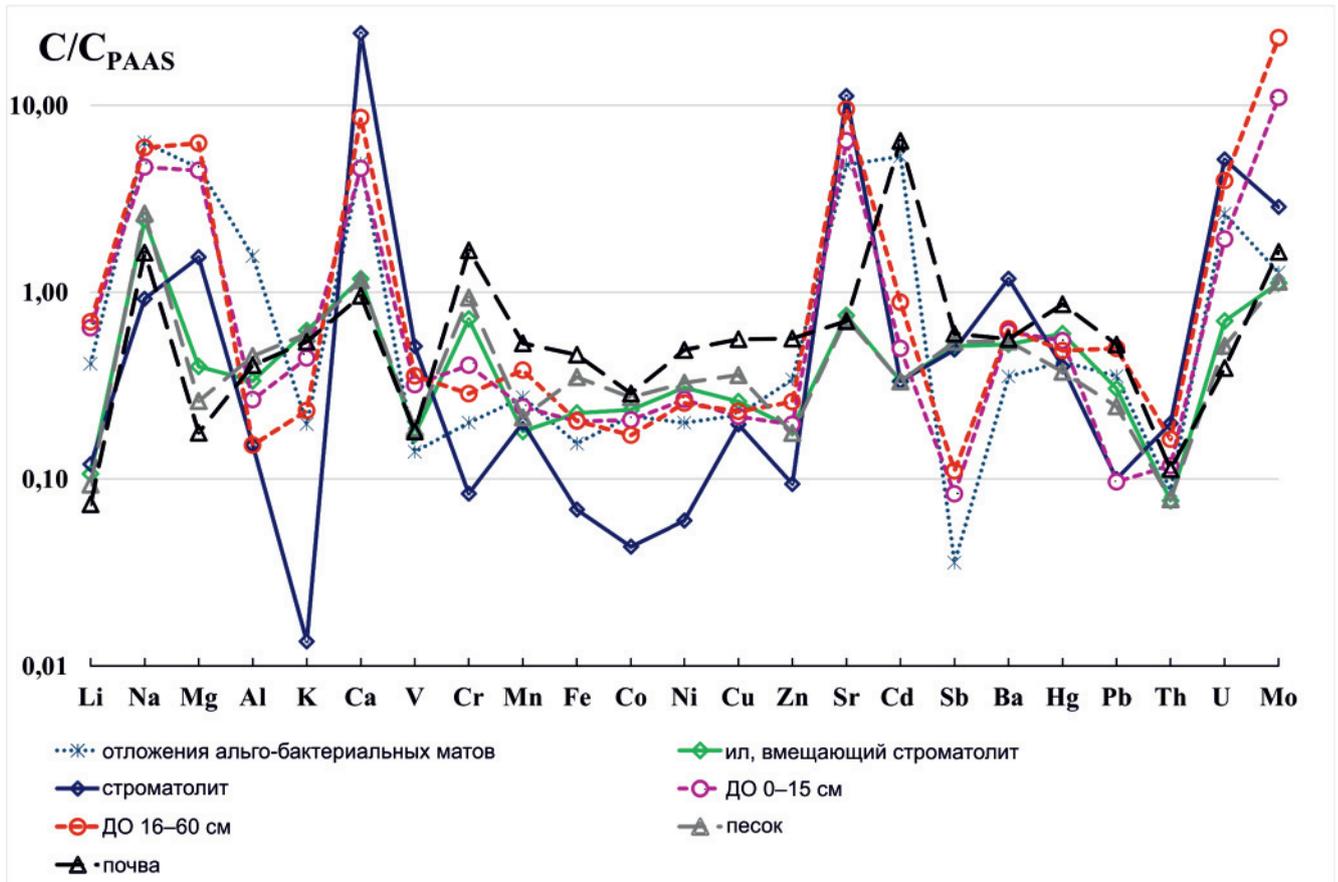


Рис. 9. Мультиэлементный спектр усредненных значений изученных элементов, нормированных к значениям PAAS по [28] в уплотненном альго-бактериальном мате, серо-зеленых илах (гл. 5–28 см), строматолите, донных отложениях (мощность разреза 60 см), почве (разрез 1,7 м), суглинке (почвообразующий субстрат)

авторов можно предположить, что повышенные значения содержания U, Mo, V, скорее всего, связаны с унаследованным сорбированием их органическим веществом, захороненным в донные отложения [22–25, 27, 29–32].

Детальное исследование распределения содержаний РЗЭ в ДО озер позволяет установить специфику обстановки накопления и источники сноса вещества в озера. При изучении геохимии РЗЭ обычно используются нормированные на хондрит или

постаршейский средний австралийский глинистый сланец (PAAS) содержания для того, чтобы устранить влияние различной распространенности химических элементов [3]. Изучаются также значения цериевой и европиевой аномалий, выраженные как  $(Ce/Ce^*)_n$ ,  $(Eu/Eu^*)_n$  и вычисленные по формулам  $(Ce_{обр}/Ce_n)/\sqrt{(La_{обр}/La_n)(Pr_{обр}/Pr_n)}$  и  $(Eu_{обр}/Eu_n)/\sqrt{(Sm_{обр}/Sm_n)(Gd_{обр}/Gd_n)}$ . Полученные аналитические данные показали, что самые низкие содержания РЗЭ установлены в строматолите, а средние – в донных отло-

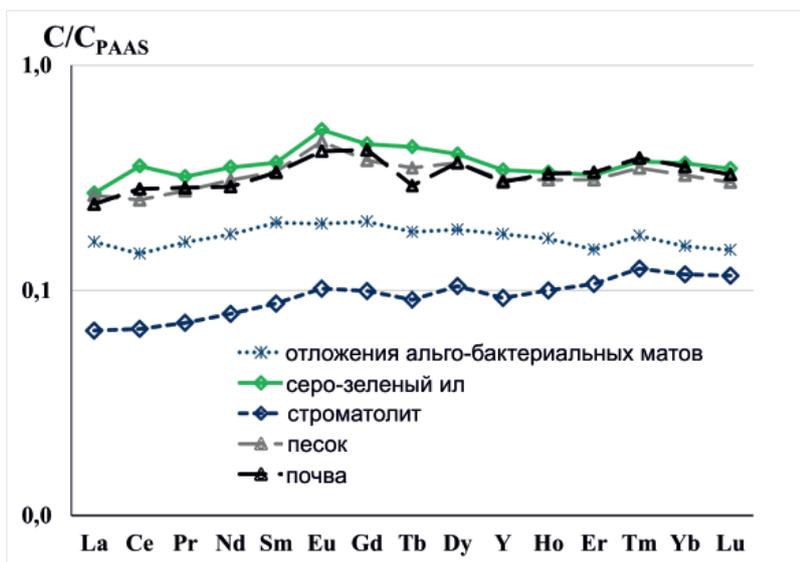


Рис. 10. Спектр распределения значений РЗЭ, нормированных на PAAS [24] в уплотненном альго-бактериальном мате, серо-зеленых илах (гл. 5–28 см), строматолите, песке прибрежной зоны, почве (разрез 1,7 м)



жениях, серо-зеленых илах из берегового разреза, песках из прибойной зоны. Концентрации содержания РЗЭ в почвах и почвообразующем субстрате (суглинках) оз. Петухово значимо не различаются. Выявлено уменьшение абсолютных содержаний РЗЭ в различных компонентах по мере увеличения в них либо карбонатов, либо органического вещества. Спектр распределения РЗЭ (рис. 10) характеризуется довольно пологим обилием с незначительным поднятием в области средних РЗЭ за исключением спектра строматолитов, в котором прослеживается пологий подъем в область тяжелых РЗЭ. Это можно объяснить тем, что строматолит образуется из вод, в которых присутствуют и растворимые формы РЗЭ, которые, как известно, обогащены подгруппой тяжелых РЗЭ. Значение  $(Eu/Eu^*)_{PAAS}$  аномалии варьирует от 0,99 в циано-бактериальном мате до 1,36 в песке прибойной зоны при практически отсутствующей европиевой аномалии во всех горизонтах донных отложений. Положительное значение  $(Eu/Eu^*)_{PAAS}$  для прибрежных песков (1,36) и почв водосбора (1,21) связано с наличием значительных количеств полевого шпата, а ее отсутствие в ДО – с условиями их восстановительного диагенеза. Считается, что формирование отрицательной цериевой аномалии в воде сопряжено с накоплением церия в твердой фазе, с которой эта вода контактирует. Полученные данные согласуются с этим утверждением, отрицательная аномалия  $(Ce/Ce^*)_{PAAS}$  (0,89) выявлена в уплотненном, усохшем циано-бактериальном мате, который, образуясь на поверхности воды в окислительных условиях и далее отмирая, залегает на серо-зеленом иле, а в нем выявлена максимальная положительная аномалия  $(Ce/Ce^*)_{PAAS}$  (1,21). Схожий характер распределения РЗЭ в почве, суглинке, песке, донных отложениях оз. Петухово с различным соотношением карбонатной и органической фракций позволяет утверждать, что РЗЭ поступает в озеро с обломочным материалом. Характер распределения РЗЭ в строматолите указывает на его формирование из озерных вод в обстановке дефицита кислорода.

## Выводы

Минерально-геохимический анализ уровня накопления U в различных компонентах озерных систем, распределения РЗЭ в ДО и водах озер, сопоставление с гидрогеохимическими данными – все это позволяет утверждать, что выявленные высокие содержания U в водах озер с высокой щелочностью обусловлены процессами метаморфизации вод. Трансформация поступающих в озеро вод (гидрокарбонатно-сульфатных натриево-магниево-кальциевых) приводит к формированию в них содовых и содово-сульфатных вод с высокой щелочностью, что способствует накоплению урана. В водах уран присутствует в виде карбонатных комплексов уранил-иона, а подвижность форм урана определяется не только окислительно-восстанови-

тельными условиями и pH вод, но и биогеохимическими процессами. При биохемогенном образовании карбонатов из данных вод происходит захват частиц органического вещества с сорбированным ураном вновь кристаллизующимися минералами. Не выявлено предполагавшейся связи высоких значений урана в водах озер Желтырь и Петухово (Кулундинская степь) с урановым гидрогенным оруденением, приуроченным к песчано-глинистым отложениям неогена и верхнего палеогена Кулундинской впадины.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Геохимические** факторы аутигенного минералообразования в донных отложениях тажеранских озер (Прибайкалье) / В. Д. Страховенко, Э. П. Солотчина, Ю. С. Восель, П. А. Солотчин // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56, № 10. – С. 1825–1841
2. **Долгушин А. П., Макарова Т. М., Царук И. И.** Урановорудный потенциал Центрально-Сибирского региона в связи с проблемой импортозамещения: доклад на VIII Междунар. горно-геол. форуме «МИНГЕО СИБИРЬ 2015». – Красноярск, 2015. – С. 28–34.
3. **Дубинин А. В.** Геохимия редкоземельных элементов в океане. – М.: Наука, 2006. – 360 с.
4. **Заварзин Г. А.** Лекции по природоведческой микробиологии. – М.: Наука, 2004. – 348 с.
5. **К биологии** соляных озер Кулундинской степи / Ф. В. Сапожников, О. Ю. Калинина, М. А. Никитин, О. С. Самылина // Океанология. – 2016. – Т. 56, № 1. – С. 101–112.
6. **Климатическая** история голоцена Западного Прибайкалья в карбонатной осадочной летописи озера Холбо-Нур / Е. В. Скляр, Э. П. Солотчина, Е. Г. Вологина и др. // Докл. РАН. – 2010. – Т. 431, № 5. – С. 668–674.
7. **Лебедева (Верба) М. П., Лопухина О. В., Калинина Н. В.** Особенности химико-минералогического состава солей в сорочных солончаках и озерах Кулундинской степи // Почвоведение. – 2008. – № 4. – С. 467–480.
8. **Леин А. Ю., Иванов М. В.** Биогеохимический цикл метана в океане. – М.: Наука, 2009. – 576 с.
9. **Лисицын А. П.** Современные представления об осадкообразовании в океанах и морях. Океан как природный самописец взаимодействия геосфер Земли // Мировой океан. – 2014. – Т. 2. – С. 331–571.
10. **Лузгин Б. Н.** Полигенность засоления почв Кулундинской степи // Сибирский экологический журнал. – 2001. – Т. 8, № 3. – С. 361–368.
11. **Минеральные** озера Приольхонья: вопросы генезиса и эволюции / О. А. Склярова, Е. В. Скляр, В. С. Федоровский, Н. Б. Санина // География и природные ресурсы. – 2004. – № 4. – С. 44–49.



12. **Никольская Ю. П.** Процессы солеобразования в озерах и водах Кулундинской степи. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР; Химико-металлургический ин-т, 1961. – 200 с.

13. **Основные** черты геохимии урана / под ред. А. В. Виноградова. 2-е изд. – Томск: СТУ, 2013. – 374 с.

14. **Оценка** влияния абиотических факторов на продукцию экосистем малых озер юга Западной Сибири / Н. И. Ермолаева, Е. Ю. Зарубина, В. Д. Страховенко и др. // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: тр. VI Всерос. симп. с междунар. участием. – Барнаул, 2017. – С. 78–83.

15. **Поведение** урана и марганца в процессе диагенеза карбонатных осадков малых озер Байкальского региона / Ю. С. Восель, В. Д. Страховенко, И. В. Макарова, С. В. Восель // Докл. РАН. – 2015. – Т. 462, № 3. – С. 335–335.

16. **Самылина О. С., Зайцева Л. В., Синетова М. А.** Участие альго-бактериального сообщества в формировании современных строматолитов в Петуховском содовом озере (Алтайский край) // Палеонт. журн. – 2016. – № 6. – С. 92–101.

17. **Страховенко В. Д., Гаськова О. Л.** Особенности образования карбонатов и минеральных фаз урана в озерах Намши-нур и Цаган-тырм (термодинамическая модель) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 9, № 4. – С. 374–385.

18. **Субетто Д. А.** Донные отложения озер: палеолимнологические реконструкции. – СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2009. – 343 с.

19. **Уран** в минерализованных озерах Алтайского края / В. П. Исупов, М. Н. Колпакова, С. В. Борзенко и др. // Докл РАН. – 2016. – Т. 470, № 5. – С. 566–569.

20. **Холодов В. Н.** Геохимия осадочного процесса / отв. ред. Ю. Г. Леонов. – М.: ГЕОС, 2006. – 608 с.

21. **Carbonate** facilitated mobilization of uranium from lacustrine sediments under anoxic conditions / M. Seder-Colomina, A. Mangeret, L. Stetten, et al. // Environmental science technology. – 2018. – Vol. 52, no. 17. – P. 9615–9624.

22. **Effects** of aqueous uranyl speciation on the kinetics of microbial uranium reduction / K. M. Belli, T. J. DiChristina, P. van Cappellen, M. Taillefert // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2015. – Vol. 157. – P. 109–124.

23. **Influence** of Mn oxides on the reduction of uranium(VI) by the metal-reducing bacterium *Shewanella putrefaciens* / J. K. Fredrickson, J. M. Zachara, D. W. Kennedy, et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2002. – Vol. 66 (18). – P. 3247–3262.

24. **Newsome L., Morris K., Lloyd J. R.** The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides // Chem. Geol. – 2014. – Vol. 363. – P. 164–184.

25. **Non-uraninite** products of microbial U(VI) reduction / R. Bernier-Latmani, H. Veeramani, E. D. Vecchia, et al. // Environ. Sci. Technol. – 2010. – Vol. 44. – P. 9456–9462.

26. **Ovdina E., Strakhovenko V., Solotchina E.** Authigenic Carbonates in the Water–Biota–Bottom Sediments' System of Small Lakes (South of Western Siberia) // Minerals. – 2020. – Vol. 10, no. 6. – P. 552.

27. **Strakhovenko V., Ovdina E., Malov G.** The carbon isotopes ratio in small lakes bottom sediments located in the forest-steppe and steppe zones of southern Siberia // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – Vol. 98. – P. 12021.

28. **Taylor S. R., McLennan S. M.** The continental crust: Its composition and evolution. – Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1985. – 330 p.

29. **The importance** of colloids for the behavior of uranium isotopes in the low-salinity zone of a stable estuary / P. S. Andersson, D. Porcelli, Ö. Gustafsson, et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2001. – Vol. 65. – P. 13–25.

30. **The stability** of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing / L. Newsome, K. Morris, S. Shaw, et al. // Chemical Geology. – 2015. – Vol. 409. – P. 125–135.

31. **Uranium** redox transition pathways in acetate-amended sediments / J. R. Bargar, K. H. Williams, K. M. Campbell, et al. // Proc. Nat. Acad. Sci. – 2013. – Vol. 110. – P. 4506–4511.

32. **Uranium** speciation and stability after reductive immobilization in aquifer sediments / J. O. Sharp, J. S. Lezama-Pacheco, E. J. Schofield, et al. // Geochim. et Cosmochim. Acta. – 2011. – Vol. 75. – P. 6497–6510.

## REFERENCES

1. Strakhovenko V.D., Solotchina E.P., Vosel Yu.S., Solotchin P.A. Geochemical factors for endogenic mineral formation in the bottom sediments of the Tazheran lakes (Baikal area). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 10, pp. 1437–1450.

2. Dolgushin A.P., Makarova T.M., Tsaruk I.I. *Uranovorudnyy potentsial Tsentralno-Sibirskogo regiona v svyazi s problemoy importozameshcheniya* [Uranium ore potential of the Central Siberian region in connection with the problem of import substitution]. *VII Mezhdunarodnyy gorno-geologicheskiiy forum "MINGEO SIBIR 2015"* [7<sup>th</sup> International Mining Geological Forum "MINGEO SIBIR 2015"]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 28–34. (In Russ.).

3. Dubinin A.V. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov v okeane* [Geochemistry of Rare Earth Elements in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2006. 360 p. (In Russ.).

4. Zavarzin G.A. *Lektsii po prirodovedcheskoy mikrobiologii* [Lectures on natural microbiology]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 348 p. (In Russ.).

5. Sapozhnikov F.V., Kalinina O.Yu., Nikitin M.A., Samylyna O.S. Cenoses of phototrophic algae of ultrashaline lakes in the Kulunda steppe (Altai kray, Russian Federation). *Oceanology*, 2016, vol. 56, no. 1, pp. 95–106.

6. Sklyarov E.V., Solotchina E.P., Vologina E.G., et al. [Holocene climate history of the Western Baikal region: carbonate sedimentary record of Kholbo-Nur



Lake]. *Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 431, no. 5, pp. 490–496.

7. Lebedeva (Verba) M.P., Lopukhina O.V., Kalinina N.V. Specificity of the Chemical and Mineralogical Composition of Salts in Solonchak Playas and Lakes of the Kulunda Steppe. *Euroasian Soil Science*, 2008, no. 4, pp. 416–428.

8. Lein A.Yu., Ivanov M.V. *Biogeokhimicheskiy tsikl metana v okeane* [Biogeochemical cycle of methane in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 2009, 576p. (In Russ.).

9. Lisitsyn A.P. [Modern conceptions of sediment formation in the oceans and seas. Ocean as a natural recorder of geospheres interaction]. *Mirovoy Okean: fizika, khimiya i biologiya okeana. T. 2* [World Ocean: physics, chemistry and biology of the ocean. Vol. 2]. Moscow, Nauchnyy Mir Publ., 2014, pp. 331–571. (In Russ.).

10. Luzgin B.N. [Polygenic Salinization of Kulunda Steppe Soils]. *Sibirskiy ekologicheskiy zhurnal – Siberian Journal of Ecology*, 2001, vol. 8, no. 3, pp. 361–368. (In Russ.).

11. Sklyarova O.A., Sklyarov E.V., Fedorovskiy V.S., Sanina N.B. [Mineral lakes of of Priolkhonie: issues of genesis and evolution]. *Geografiya i prirodnyye resursy*, 2004, no. 4, pp. 44–49. (In Russ.).

12. Nikolskaya Yu.P. *Protsessy soleobrazovaniya v ozerakh i vodakh Kulundinskoy stepi* [Processes of salt formation in lakes and waters of the Kulunda steppe]. Novosibirsk, SB AS USSR Publ., 1961. 200 p. (In Russ.).

13. Vinogradov A.V., ed. *Osnovnyye cherty geokhimii urana* [Main features of the Uranium Geochemistry]. Tomsk, STT Publ., 2013. 374 p. (In Russ.).

14. Ermolaeva N.I., Zarubina E.Yu., Strakhovenko V.D., et al. [The effect of abiotic factors on the productivity of small lakes in the South of Western Siberia]. *Trudy VI Vserossiyskogo simpoziuma s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 6<sup>th</sup> All-Russian Symposium with international participation]. Barnaul, 2017, pp. 78–83. (In Russ.).

15. Vosel Yu.S., Strakhovenko V.D., I.V. Makarova, Vosel S.V. The behavior of uranium and manganese under the diagenesis of carbonate sediments in small lakes of the Baikal region. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462, no. 1, pp. 522–526.

16. Samylina O.S., Zaytseva L.V., Sinetova M.A. Participation of algal-bacterial community in the formation of modern stromatolites in Cock Soda Lake, Altai region. *Paleontological Journal*, 2016, vol. 50, no. 6, pp. 635–645.

17. Strakhovenko V.D., Gaskova O.L. Thermodynamic model of formation of carbonates and uranium mineral phases in lakes Namshi-Nur and Tsagan-Tyrm (Cisbaikalia). *Russian Geology and Geophysics*, 2018, vol. 59, no. 4, pp. 374–385.

18. Subetto D.A. *Donnyye otlozheniya ozer: paleolimnologicheskiye rekonstruktsii* [Bottom sediments of lakes: paleolimnological reconstructions]. Saint Petersburg, Russian State Pedagogical University, 2009. 343 p. (In Russ.).

19. Isupov V.P., Kolpakova M.N., Borzenko S.V., et al. Uranium in the mineralized lakes of Altai Krai. *Doklady Earth Science*, 2016, vol. 470, no. 5, pp. 1067–1070.

20. Kholodov V.N. *Geokhimiya osadochnogo protsessa* [Geochemistry of a Sedimentary Process]. Moscow, GEOS Publ., 2006. 608 p. (In Russ.).

21. Seder-Colomina M., Mangeret A., Stetten L., et al. Carbonate facilitated mobilization of uranium from lacustrine sediments under anoxic conditions. *Environmental science technology*, 2018, vol. 52, no. 17, pp. 9615–9624.

22. Belli K.M., DiChristina T.J., van Cappellen P., Taillefert M. Effects of aqueous uranyl speciation on the kinetics of microbial uranium reduction. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2015, vol. 157, pp. 109–124.

23. Fredrickson J.K., Zachara J.M., Kennedy D.W., et al. Influence of Mn oxides on the reduction of uranium(VI) by the metal-reducing bacterium *Shewanella putrefaciens*. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2002, vol. 66 (18), pp. 3247–3262.

24. Newsome L., Morris K., Lloyd J.R. The biogeochemistry and bioremediation of uranium and other priority radionuclides. *Chem. Geol.*, 2014, vol. 363, pp. 164–184.

25. Bernier-Latmani R., Veeramani H., Vecchia E.D., et al. Non-uraninite products of microbial U(VI) reduction. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, pp. 9456–9462.

26. Ovdina E., Strakhovenko V., Solotchina E. Authigenic Carbonates in the Water–Biota–Bottom Sediments' System of Small Lakes (South of Western Siberia). *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 6, pp. 552.

27. Strakhovenko V., Ovdina E., Malov G. The carbon isotopes ratio in small lakes bottom sediments located in the forest-steppe and steppe zones of southern Siberia. *E3S Web of Conferences – EDP Sciences*, 2019, vol. 98, p. 12021.

28. Taylor S.R., McLennan S.M. The continental crust: its composition and evolution. Oxford, Blackwell Sci. Publ., 1985. 330 p.

29. Andersson P.S., Porcelli D., Gustafsson Ö., et al. The importance of colloids for the behavior of uranium isotopes in the low-salinity zone of a stable estuary. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2001, vol. 65, pp. 13–25.

30. Newsome L., Morris K., Shaw S., et al. The stability of microbially reduced U(IV); impact of residual electron donor and sediment ageing. *Chemical Geology*, 2015, vol. 409, pp. 125–135.

31. Bargar J.R., Williams K.H., Campbell K.M., et al. Uranium redox transition pathways in acetate-amended sediments. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2013, vol. 110, pp. 4506–4511.

32. Sharp J.O., Lezama-Pacheco J.S., Schofield E.J., et al. Uranium speciation and stability after reductive immobilization in aquifer sediments. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2011, vol. 75, pp. 6497–6510.

© В. Д. Страховенко, Е. А. Овдина, Г. И. Малов, 2022