УДК 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

УРАН И ТОРИЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СОЛЕНЫХ ОЗЕР ИШИМСКОЙ СТЕПИ (СЕВЕРНЫЙ КАЗАХСТАН)

Карпов Александр Викторович[1],
theblake@mail.ru

Владимиров Александр Геннадьевич[1,2],
vladimir@igm.nsc.ru

Разворотнева Людмила Ивановна[1],
rasvorot@igm.nsc.ru

Кривоногов Сергей Константинович[1],
s_krivonigov@mail.ru

Николаева Ирина Викторовна[1],
inikol@igm.nsc.ru

Мороз Екатерина Николаевна[1],
ekaterina.n.moroz@gmail.com

[1] Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

[2] Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Актуальность работы *связана с необходимостью оценки экологической безопасности освоения высокоминерализованных озер Ишимской степи (Западная Сибирь – Северный Казахстан). Эти озера расположены на границе с Северо-Казахстанской урановорудной провинцией, что предполагает выщелачивание урана и тяжелых металлов поверхностными и подземными водами и их последующее депонирование в донных озерных отложениях.*

Цель работы: *определение химического и минерального состава донных отложений соленых озер Ишимской степи, а также содержаний и форм нахождения урана в донных отложениях для оценки их экологической безопасности для сельскохозяйственного освоения.*

Методы исследования: *методики ступенчатого выщелачивания донных отложений, рентгенофлуоресцентный анализ, рентгеноструктурный анализ, ИК-спектрометрия, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой.*

Результаты *исследований показали, что в приповерхностном слое (0–1 м) донных отложений соленых озер Ишимской степи содержания радиоактивных элементов не превышают фоновый уровень (U=0,78–3,3 г/т, Th=1,2–8,1 г/т, Th/U=1,5–4,7), который характерен для бессточных водоемов Западной Сибири. Поскольку приповерхностные донные осадки озёр обладают низкими содержаниями урана, тория и тяжелых металлов-токсикантов, это позволяет рассматривать Ишимскую степь как экологически-безопасный регион для сельскохозяйственного освоения земель и лечебно-профилактического использования илов в бальнеологии. На основании полученных данных сделан вывод, что главным фактором концентрирования и перераспределения урана в озерных котловинах Ишимской степи являются процессы интенсивной солевой дефляции, которые вызывают опесчанивание озер и, как следствие, – обеднение ураном приповерхностного слоя донных отложений.*

Ключевые слова:
Геоэкология, гидрогеохимия, система «вода–алюмосиликаты», соленые озера, донные отложения, уран, торий, тяжелые металлы, Ишимская степь, Северный Казахстан.

Введение

Загрязнение окружающей среды химическими веществами различной природы и происхождения в настоящее время оказывает все большее давление на природное равновесие в глобальном масштабе. Проблема загрязнения окружающей среды выходит на первый план и для Северного Казахстана – степного региона с многочисленными бессточными озёрами, воды которых обладают высокой минерализацией, а донные отложения способны аккумулировать значительные запасы радиоактивных элементов (РАЭ) и тяжелых металлов (ТМ). Изучение донных отложений изолированных водоемов – одно из перспективных направлений современной геохимии экосистем [1]. Исследование донных отложений позволяет получить не только новую индикаторную информацию о динамике изменения окружающей среды, но также определять механизмы концентрирования и перераспределения РАЭ и ТМ, которые, с одной стороны, являются ценными рудными компонентами, а с другой – элементами-токсикантами по отношению к окружающей среде [2–4].

Ишимская степь является непосредственным продолжением Кулундинской степи в Алтайском

крае Российской Федерации, здесь также расположены озёра, уникальные по запасам минеральных солей. Эти озёра представляют практический интерес для промышленного освоения как источник природных минералов – мирабилита, галита, соды и гипса [5]. Кроме того, они обладают значительными запасами уникальных лечебных илов и специфическими галофильными формами организмов, в частности жаброногими рачками артемиями (*Artemia salina L.*) [5–7]. Важно подчеркнуть, что Ишимская степь в Казахстане, в отличие от Кулундинской степи Алтайского края, сейчас практически исключена из промышленного и сельскохозяйственного оборота и, как следствие, – здесь стабилизированы фоновые содержания РАЭ и ТМ, сохранились эколого-ландшафтные обстановки и биогеоценозы, характерные для Западной Сибири [8].

Специфика Ишимской степи связана с тем, что эта территория непосредственно прилегает к Северо-Казахстанской урановорудной провинции, что предполагает выщелачивание урана и других тяжёлых металлов из горных пород и руд в солёные бессточные озёра поверхностными и подземными водами. Учитывая геоморфологическую характеристику соленых озер Ишимской степи, следует обратить внимание на месторождение Семизбай (рис. 1). Это месторождение, примыкающее к границе уступа между Северо-Казахстанским мелкосопочником и Ишимской степью, относится к гидрогенным урановым месторождениям песчаникового типа и, по существу, представляет собой ореол накопления урана в карбонатно-песчаниковых толщах юрско-мелового возраста. Урановые руды месторождения Семизбай представлены рыхлым и слабоцементированным песчаниковым материалом, иногда с карбонатным цементом. Рудная минерализация представлена оксидами урана и коффинитом $(U,Th)(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}$. Повышенные концентрации урана наблюдаются на поверхностях обломков обеленных песчаников, в частичках углефицированного растительного детрита и катунах красных глин. Эти накопления урана весьма благоприятны для выщелачивания, что подтверждено экспериментальными исследованиями [9].

Цель и задачи статьи: 1) определение химического и минерального состава донных отложений соленых озер Ишимской степи; 2) определение содержания и форм нахождения урана в приповерхностном слое донных отложений; 3) анализ механизмов перераспределения РАЭ и ТМ в результате экзогенного выветривания соленых озер и их донных отложений.

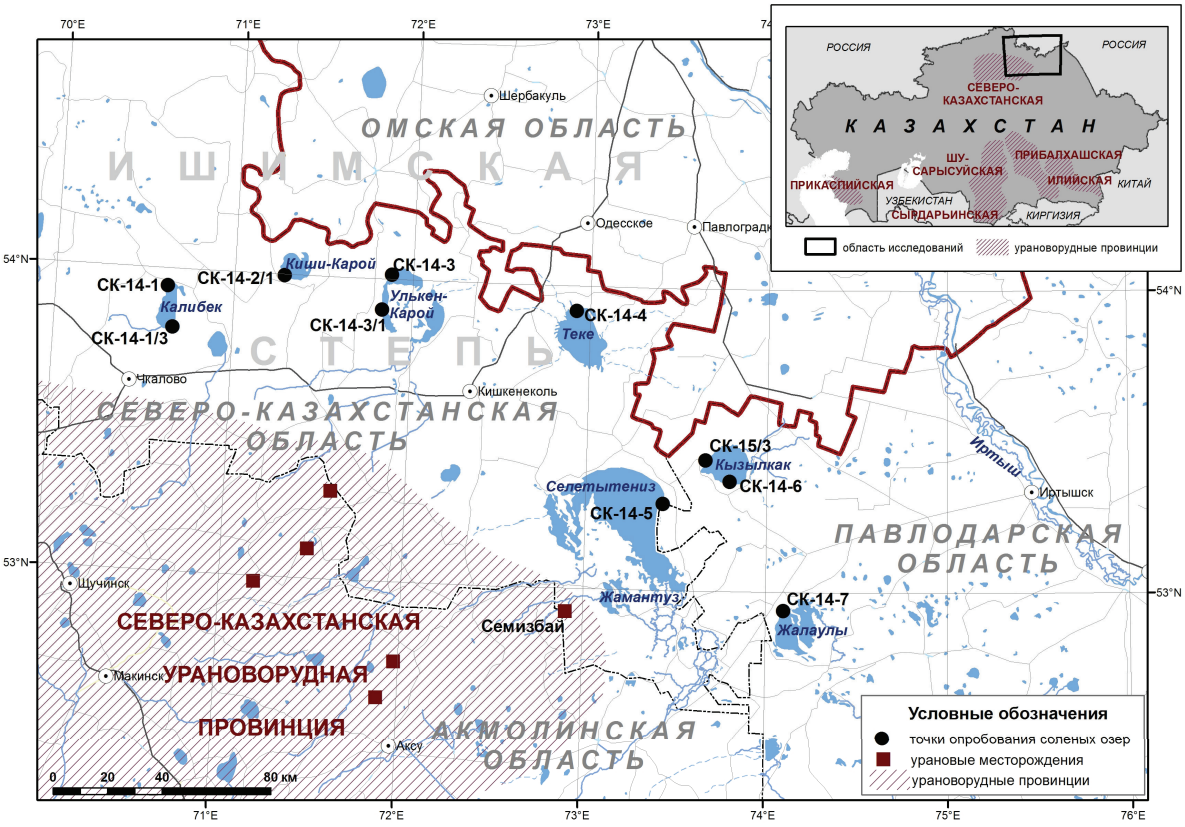


Рис. 1. *Географическая схема расположения соленых озёр в Северном Казахстане (Ишимская степь). Квадратами показаны урановорудные месторождения, включая экзогенное месторождение Семизбай*

Fig. 1. *Location of the saline lakes in Northern Kazakhstan (Ishim plain). Uranium deposits including exogenic Semizbai deposit are marked as the squares*

Геокартография и схема опробования озер

Исследованные озера расположены на южной окраине Западно-Сибирской равнины в зоне перехода к Казахскому мелкосопочнику. Эта часть Западной Сибири известна в русскоязычной литературе как Ишимская степь (рис. 1). Она занимает большую часть Ишим-Тобольского и Ишим-Иртышского междуречий и протягивается на 400 км с запада на восток, на 350 км с юга на север. Для равнины характерна слабая расчлененность поверхности, практически полное отсутствие местной сети долин и обилие замкнутых депрессий, занятых солёными озёрами. Равнина слабо наклонена на север и восток. Ее южная часть имеет отметки 160–170 м, центральная – 140–150 м, а северная и восточная – 130 м (рис. 1). Стратиграфический разрез представлен мезо-кайнозойскими отложениями мощностью 1–1,5 км. Четвертичные толщи небольшой мощности представлены преимущественно озерными отложениями эоплейстоцена и покровами лессовидных суглинков среднего-позднего плейстоцена. Подстилающие дочетвертичные отложения имеют субгоризонтальное залегание (пластовые равнины), местами выходят на поверхность и имеют палеогеновый возраст в западной и неогеновый возраст в восточных частях района исследования [10–13]. В основании олигоценового разреза повсеместно развит водоупор, представленный морскими глинами чеганской (ишимской) свиты. Выше по разрезу от регионального водоупора водоносные горизонты средней и нижней части континентальных олигоценовых отложений гидравлически связаны [14].

В ходе российско-казахстанских экспедиций (2014–2015 гг.) были получены новые данные по составу воды и донных отложений соленых озер Ишимской степи. Схема опробования и каталог образцов приведены в табл. 1, космоснимки – на рис. 2. Следует отметить, что для двух озер из-за заболоченности прибрежной полосы не удалось отобрать пробы озерной воды и были взяты только керны донных отложений (оз. Селетытениз, оз. Улькен-Карой). Порядковые номера проб (№ №) являются сквозными для всех таблиц в настоящей статье.

Характеристика объектов исследования

Соленые озера Ишимской степи приурочены к изолированным впадинам, они являются бессточными и различаются по морфологии котловин, площади водосборов и характеру питания (рис. 2). Озера питаются преимущественно атмосферными осадками, формирующими поверхностный сток в виде небольших рек и овражно-балочной сети. Озера с большей площадью водосбора – слабосоленые (оз. Селетытениз, оз. Улькен-Карой), а озера с меньшим водосбором – сильносоленые (оз. Жалаулы, оз. Кызылкак, оз. Теке, оз. Киши-Карой, оз. Калибек) (табл. 2).

Таблица 1. *Схема опробования соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан)*

Table 1. *Sampling scheme of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan)*

№	Озеро Lake	GPS-координаты GPS-coordinates	Пробы воды Water samples	Пробы донных отложений Sediment samples
1	Калибек Kalibek	N=53.56,552 E=70.37,547	–	СК 14-1
2		N=53.48,412 E=70.40,012	СК 14-1/3	СК 14-1/3
3	Киши-Карой Kishi-Karoy	N=53.59,840 E=71.16,633	СК 14-2/1	СК 14-2/1
4	Улькен-Карой Ulken-Karoy	N=53.53,912 E=71.49,853	–	СК 14-3/1
5		N=54.00,940 E=71.52,747	–	СК 14-3
6	Теке Teke	N=53.55,090 E=72.55,380	СК 14-4	СК 14-4
7	Селетытениз Seletyteniz	N=53.17,208 E=73.25,653	–	СК 14-5
8	Кызылкак Kyzylkak	N=53.21,827 E=73.47,637	СК 15-3	СК 14-6
9	Жалаулы Zhalauly	N=52.56,332 E=74.05,960	СК 14-7	СК 14-7

Примечание. Авторы проб: А.Г. Владимиров, Л.В. Куйбида, В.В. Хлестов, А.В. Карпов.

Note. Samples were collected by A.G. Vladimirov, L.V. Kuybida, V.V. Khlestov, A.V. Karpov.

Таблица 2. *Общая минерализация, pH, Eh и содержания радиоактивных элементов в водах соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан)*

Table 2. *Total dissolved solids, pH, Eh and radioactive elements concentrations in waters of the Ishim plain saline lakes (Northern Kazakhstan)*

№	Озеро Lake	роба Sample	pH	Eh, мВ (mV)	TDS, г/л (g/l)	U, мкг/л (μg/l)	Th, мкг/л (μg/l)
2	Калибек Kalibek	СК 14-1/3	6,4	285	314	1,5	<0,5
3	Киши-Карой Kishi-Karoy	СК 14-2/1	7,28	140	370	8,0	
6	Теке Teke	СК 14-4	7,1	260	376	7,9	
8	Кызылкак Kyzylkak	СК-15-3	7,0	280	315	7,0	
9	Жалаулы Zhalauly	СК 14-7	6,72	260	356	9,5	

Примечание. №/№ проб отвечают таблице 1.

Note. No. of the samples are identical to those in the table 1.

Установлено [8], что для большинства озер характерно преобладание хлоридно-натриевого (оз. Калибек), натриево-магниевого (оз. Киши-Карой, оз. Теке, оз. Кызылкак) или магниево-натриевого (оз. Жалаулы) гидрогеохимических типов с общей соленостью более 300 г/л (табл. 2). Значение pH варьируется от 6,4 до 7,3, что отражается также в присутствии в водах CO_2 до 350 мг/л. Содержание гидрокарбонат-иона в озерах незначи-

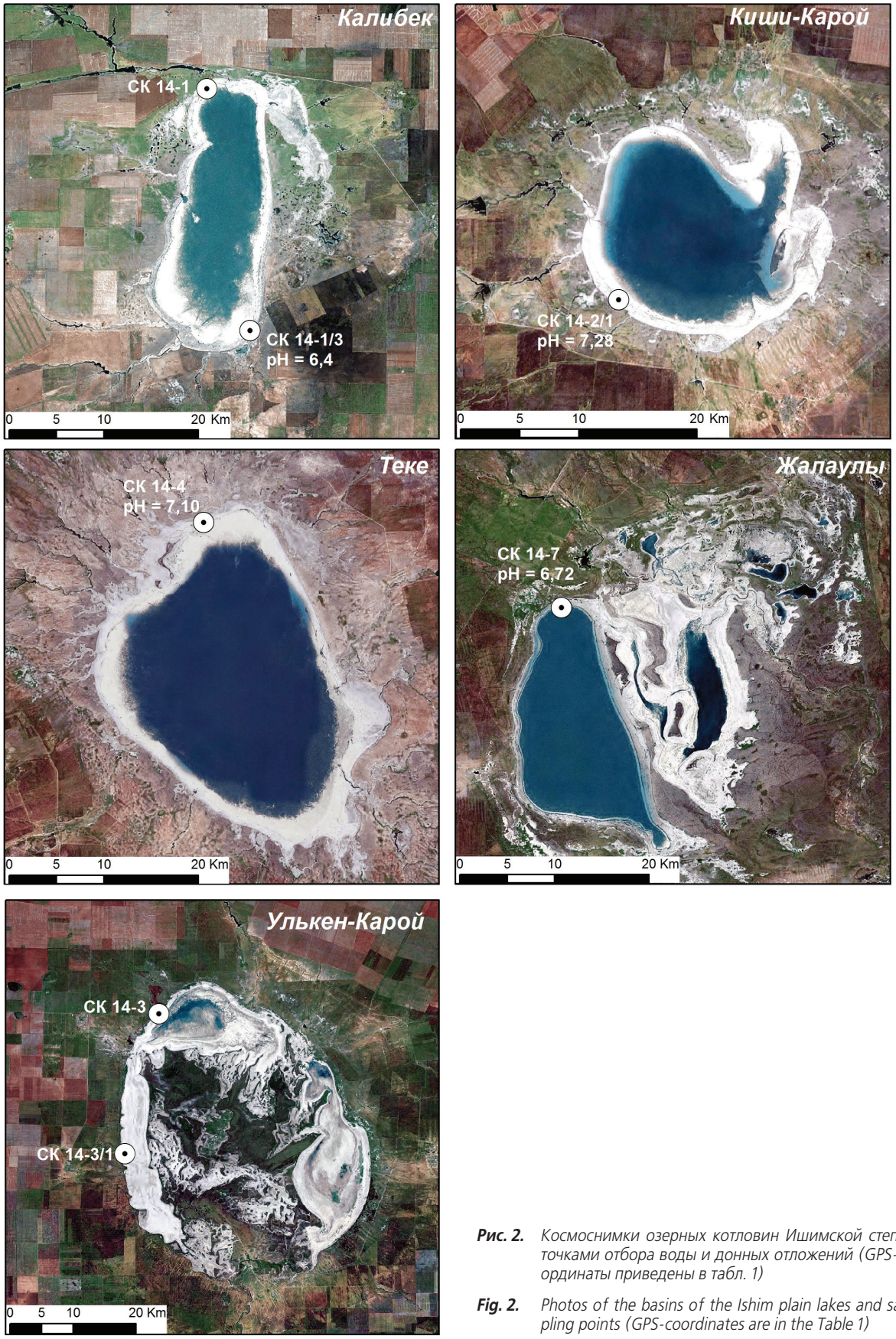


Рис. 2. *Космоснимки озерных котловин Ишимской степи с точками отбора воды и донных отложений (GPS-координаты приведены в табл. 1)*

Fig. 2. *Photos of the basins of the Ishim plain lakes and sampling points (GPS-coordinates are in the Table 1)*

тельно (от 0,08 до 1,5 г/л), в то время как содержания хлорид-иона и сульфат-иона могут достигать 205 и 75 г/л соответственно.

На дне озер накапливаются глинисто-песчаные отложения, преимущественно являющиеся продуктами размыва берегов. Вместе с тем значительную часть донных отложений составляют аутигенные минералы, выпадающие из пересыщенных солями озерных вод. Озерные ванны заполнены осадками, благодаря чему озера имеют незначительные глубины.

Методика исследований

Керны донных отложений глубиной 0–1 м отбирали с помощью пластиковых трубок. Образцы воды отбирали с глубины 10–20 см в чистые пластиковые бутылки без фильтрования, а образцы, предназначенные для микроэлементного анализа, – в чистые пластиковые бутылки объемом 0,5 л и подкисляли 2 мл концентрированной азотной кислоты марки «ос. ч.», перегнанной дважды на установке для перегонки без кипения.

Оценка литологического состава кернов донных отложений была выполнена с шагом 3–5 см методом ступенчатого выщелачивания. При помощи шприца отбирали 5 $см^3$ образца и высушивали при температуре около 80 °С. Определение содержания водорастворимых солей было выполнено выщелачиванием водой в соотношении проба: вода 1:20, содержания карбонатов – выщелачиванием разбавленной соляной кислотой. Для отделения глины от песка к образцу приливали воду и взбалтывали, после чего ждали несколько секунд для осаждения песка и отбрасывали верхнюю часть смеси (смесь воды и глины). Процедуру повторяли до исчезновения окраски воды. Количество органики оценивали из отдельной пробы как потери при прокаливании (ППП) при 800 °С. После определения литологических характеристик пробы усредняли и квартовали для последующего определения химического и минерального состава донных отложений.

Фазовый состав донных осадков определялся рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН-3 в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (излучение CuK_α, графический монохроматор). Съемка ИК-спектров проводилась на двухлучевом спектрометре Specord 75 IR в области 400–4000 $см^{-1}$ с таблеткой чистого KBr в канале сравнения. Запись велась в режиме пропускания.

Определение содержания петрогенных оксидов в донных отложениях проводилось методом РФА в той же лаборатории. Анализируемую пробу сушили при 105 °С в течение 1 часа, затем прокаливали при 1000 °С в течение 2,5 часов, после чего 0,5 г образца смешивали с 4,5 г флюса (66,67 % тетрабората лития; 32,83 % метабората лития и 0,5 % лития бромистого). Смесь плавили в платиновых тиглях в индукционной печи Lifumat-2,0-Ox (Linn High Therm Gmbh). Полученные стекла анализировали на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL-9900-XP (Thermo Electron Corporation). Для построения градуировочных графиков использовали стандартные образцы состава горных пород, а также химреактивы (петрогенные оксиды марки «ч. д. а.» и «ос. ч.»).

Определение содержаний урана, тория и тяжелых металлов в донных отложениях проводилось методом ИСП-МС в лаборатории изотопно-аналитических методов ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия). Из усредненных проб керна брали навеску 0,050 г, помещали в тигель из стеклоуглерода, смачивали водой, прибавляли 10 мл фтористоводородной кислоты и 5 мл хлорной кислоты, а затем выпаривали до полного удаления хлорной кислоты. Далее добавляли 5 мл хлорной кислоты, разбавленной 1:1, и упаривали. Для полного удаления следов фтористоводородной кислоты пробы ещё дважды обрабатывали разбавленной 1:1 хлорной кислотой. К сухому остатку приливали 16 мл хлорной кислоты и нагревали с последующим переводом в колбу на 100 мл. Перед ИСП-МС-измерениями полученные растворы разбавляли в 100 раз с добавлением внутреннего стандарта. Для разбавления использовали воду высокой степени очистки (сопротивление 18,2 M·W·см), полученную при помощи системы MilliQ фирмы Millipore. Градуировка была выполнена по многоэлементным эталонным растворам. Для учета матричного влияния и дрейфа сигнала в качестве внутреннего стандарта выбран индий с концентрацией 1 мкг/л.

Определение форм нахождения урана было проведено методом пятиступенчатого выщелачивания [15]. Пробы донных отложений высушивали в течение 4-х часов при температуре 105 °С, затем растирали в агатовых ступках. Выщелачивание проводили из навески сухой пробы массой 1 г. Для определения водорастворимой формы урана к образцу приливали воду в соотношении проба: вода 1:15 при температуре 25 °С. Затем в течение 1 часа проводили активное перемешивание пробы на магнитных мешалках при 15 тыс. об/мин. Твердую фазу отделяли от жидкой методом центрифугирования при 15 тыс. об/мин. Определение содержания ионообменных форм урана проводили при помощи выщелачивания 15 мл 1 М раствора $MgCl_2$ при pH 7 в течение часа при 25 °С. Отделение твердой фазы от жидкой – методом центрифугирования (15 тыс. об/мин). Карбонатные формы определяли с помощью выщелачивания 1 М раствором CH_3COONH_4 при pH 5 и 25 °С в течение 5 часов. Гидроксидные формы – с помощью выщелачивания 2 М раствором гидроксиламин-гидрохлорида ($NH_2OH{\cdot}HCl$) в 25%-й уксусной кислоте в течение 6 часов при температуре 96 °С. Органические формы определяли выщелачиванием смесью 0,02 М HNO_3 и 30 % H_2O_2 в соотношении 17:8 с буферированием раствором азотной кислоты до pH 2 при температуре 85 °С в течение 2 часов. Остатки пробы подвергали кислотному разложению по описанной выше методике [15].

Результаты исследований и их обсуждение

Петрохимический состав донных отложений приведен в табл. 3. Судя по интервальной характеристике кернов (авторские неопубликованные данные), донные отложения всех исследованных озер имеют однотипное строение: в верхних частях преобладают песчаники с примесью органического материала и редкими желваками солей (пробы № 2, 3, 5–9), в нижних частях вскрываются черные суглинки с высоким содержанием органического материала (пробы № 1, 4). Для последних характерна пониженная кремнекислотность (41–48 мас. % SiO_2), относительно высокие содержания железа (4,8–5,0 мас. % ΣFe_2O_3) и потерь при прокаливании (ППП=18–20 мас. %), которые, вероятнее всего, коррелируют с содержанием органического материала.

Минеральный состав донных отложений приведен в табл. 4. Черные суглинки, богатые органикой, удалось вскрыть только в прибрежной полосе озер Калибек и Улькен-Карой (в табл. 4 эти пробы отмечены серым фоном). Особый интерес представляет проба СК 14–3/1, где обнаружена примесь уранового минерала – раббиттита ($Ca_3Mg_3(UO_2)_2(CO_3)_3(OH)_4{\cdot}18H_2O$), в ассоциации с гипсом, ангидритом, слюдой и монтмориллонитом. Эти предварительные данные требуют перепроверки и термодинамического тестирования системы «вода–алюмосиликаты». Остальные пробы отражают смену минеральных форм приповерхностного слоя донных отложений и коррелируют-

Таблица 3. *Содержание петрогенных оксидов в приповерхностных (0–1 м) донных отложениях соленых озёр Ишимской степи (Северный Казахстан), мас. %*

Table 3. *Petrogenic oxides concentrations in the upper layer (0–1 m) of the sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan), wt. %*

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	47,59	69,81	71,28	40,87	63,79	70,76	53,81	67,63	83,34
TiO_2	0,68	0,37	0,47	0,63	0,55	0,28	0,64	0,53	0,14
Al_2O_3	11,52	5,29	6,75	13,20	8,81	3,62	12,53	8,83	3,63
ΣFe_2O_3	4,79	1,83	2,90	5,14	3,22	1,55	5,41	3,38	1,33
MnO	0,08	0,05	0,05	0,08	0,05	0,05	0,08	0,06	0,02
MgO	3,68	1,58	2,14	3,29	1,93	3,28	3,01	2,24	1,36
CaO	5,35	3,19	2,89	10,54	5,69	2,30	4,04	2,91	0,85
Na_2O	3,81	3,17	2,41	2,80	1,88	3,33	3,56	2,48	1,68
K_2O	1,03	0,78	0,89	1,47	1,12	0,51	1,50	1,29	0,62
P_2O_5	0,12	0,06	0,09	0,15	0,09	0,06	0,10	0,08	0,02
BaO	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04
SO_3	0,80	1,35	0,83	3,22	0,65	2,36	0,99	0,35	0,41
ППП LOI	19,72	11,64	9,23	18,01	11,75	11,52	13,84	10,08	6,06
Σ	99,21	99,16	99,97	99,44	99,57	99,65	99,56	99,91	99,50

Примечание. № проб отвечают табл. 1. Литологический состав проб: 1, 4 – черные суглинки, богатые органикой (выделены серым цветом); 2, 3, 5–9 – засоленные песчаники, обедненные органикой.

Note: No. of the samples are identical to those in the table 1. Lithological composition of the samples: 1, 4 are the organic-rich black loams (emphasized by gray color); 2, 3, 5–9 are the organic-depleted salt sandstones.

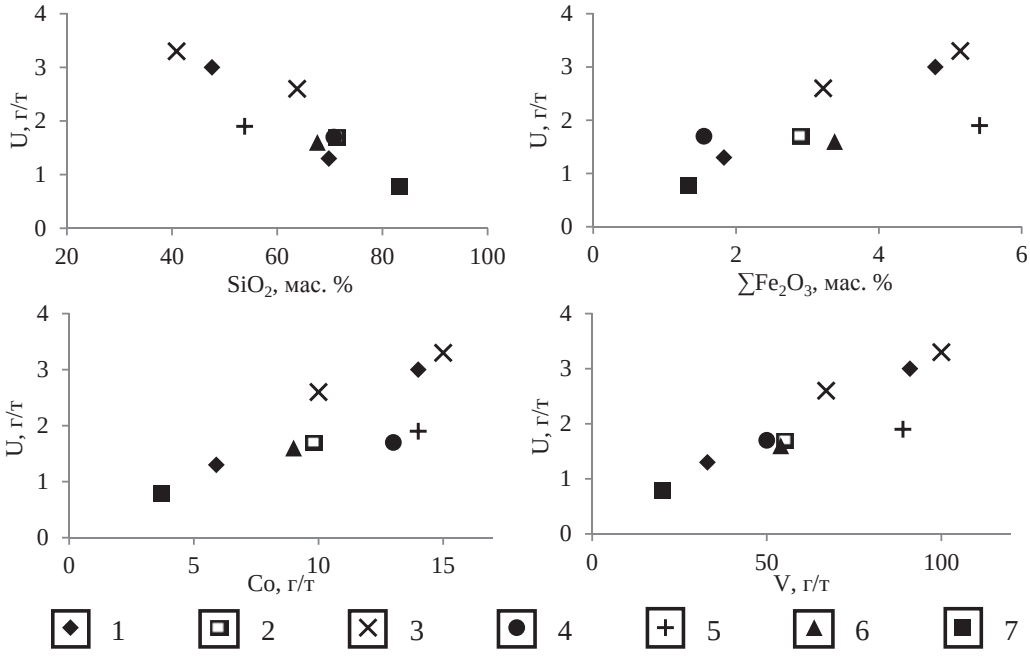


Рис. 3. *Корреляция урана с петрогенными оксидами и тяжелыми металлами в донных отложениях озер Ишимской степи (Северный Казахстан). Условные обозначения: 1 – оз. Калибек, 2 – оз. Киши-Карой, 3 – оз. Улькен-Карой, 4 – оз. Теке, 5 – оз. Селетытениз, 6 – оз. Кызылкак, 7 – оз. Жалаулы*

Fig. 3. *Correlations between uranium and petrogenic oxides and trace elements in the Ishim plain lakes sediments (Northern Kazakhstan). Lakes: 1 – Kalibek, 2 – Kishi-Karoy, 3 – Ulken-Karoy, 4 – Teke, 5 – Seletyteniz, 6 – Kyzylkak, 7 – Zhalauly*

Таблица 4. *Фазовый состав донных отложений соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан), определенный методом РСА*
Table 4. *Mineral composition of the sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan) determined by X-ray diffraction analysis*

Минералы Minerals	Химический состав Chemical formula	№								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Основная фаза/Main fraction:										
кварц/quartz	SiO_2	+	+	+	+	+	+	+	+	+
гипс/gypsum	$CaSO_4{\cdot}2H_2O$	–	–	–	+	–	–	–	–	–
Примеси/Traces:										
галит/halite	NaCl	+	+	+	–	+	–	+	+	+
кальцит/calcite	$CaCO_3$	+	+	+	–	+	+	+	+	+
плагиоклаз/plagioclase	$(Ca,Na)(Al,Si)[AlSi_2O_8]$	+	+	+	+	+	+	–	–	+
смектит/smectite	$(Mg_{0,33}Al_{1,67})_2(OH)_2(Si_2O_5)_2{\cdot}Na_{0,33}(H_2O)_4$	+	+	+	+	+	+	+	+	–
мусковит/muscovite	$KAl_2[AlSi_3O_{10}][OH]_2$	+	+	+	+	+	+	+	+	–
хлорит/chlorite	$(Mn,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	+	+	+	+	+	+	+	+	–
каолинит/kaolinite	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	+	–	+	+	+	+	+	+	–
ангидрит/anhydrite	$CaSO_4$	+	+	+	+	–	+	+	+	+
гипс/gypsum	$CaSO_4{\cdot}2H_2O$	+	+	+	–	–	–	+	+	–
амфибол/amphibole	$(Ca,Mg,Fe)_7[Si_4O_{11}]_2(OH)_2$	+	–	–	–	+	–	–	+	–
доломит/dolomite	$CaMg\,[CO_3]_2$	+	+	–	–	–	+	–	–	+
мирабилит/mirabilite	$Na_2SO_4{\cdot}10H_2O$	–	–	–	–	–	+	–	–	–
пирссонит/pirssonite	$CaCO_3{\cdot}Na_2CO_3{\cdot}H_2O$	–	–	–	–	–	+	–	–	–
вайнбергит/vinebergite	$Al_4SO_4(OH)_{10}{\cdot}7H_2O$	–	–	–	–	–	+	–	–	–
диопсид/diopside	$CaMg\,[Si_2O_6]$	–	–	–	–	–	–	–	–	+
тенардит/tenardite	Na_2SO_4	–	–	+	–	–	–	–	–	–
раббиттит/rabbittite	$Ca_3Mg_3(UO_2)_{2(}(CO_3)_3(OH)_4{\cdot}18H_2O$	–	–	–	+	–	–	–	–	–
гематит/hematite	Fe_2O_3	–	–	–	–	–	–	–	–	+
бианчит/bianchite	$(Zn,Fe)\,SO_4$	–	–	–	–	–	–	–	–	+
монтмориллонит/montmorillonite	$(Na,Ca)_{0,33}(Al,Mg)_2(Si_4O_{10})(OH)_2{\cdot}nH_2O$	+	–	+	+	+	–	+	+	–

Примечание. № проб отвечают таблице 1. Литологический состав проб: 1, 4 – черные суглинки, богатые органикой (выделены серым цветом); 2, 3, 5–9 – засоленные песчаники, обедненные органикой.

Note. No. of the samples are identical to those in the table 1. Lithological composition of the samples: 1, 4 are the organic-rich black loams (emphasized by gray color); 2, 3, 5–9 are the organic-depleted salt sandstones.

ся с выносом органического материала, опесчаниванием прибрежной каймы водных резервуаров, повсеместным выпадением галита, кальцита, ангидрита, реже – мирабилита (оз. Теке).

Уран, торий и тяжелые металлы. Результаты аналитических исследований приведены в табл. 5. Из представленных данных видно, что по уровню накопления РАЭ (U=0,78–3,3 г/т, Th=1,2–8,1) донные осадки озер Ишимской степи близки к донным осадкам озер Алтайского края ($U_{ср}$=2,5 г/т, $Th_{ср}$=7,4 г/т), Республики Алтай ($U_{ср}$=2,6 г/т, $Th_{ср}$=6,3 г/т), Новосибирской области ($U_{ср}$=3,5 г/т, $Th_{ср}$=7,1 г/т) [16] и бессточных озер Томской области ($U_{ср}$=3,3 г/т, $Th_{ср}$=7,1 г/т) [1].

Обнаружены корреляционные связи между содержаниями урана в донных отложениях и содержаниями петрогенных оксидов (SiO_2, ΣFe_2O_3) и тяжелых металлов (V, Co) (рис. 3).

Положительная корреляция содержания урана в приповерхностных донных отложениях с содержанием V и Co позволяет предположить, что присутствие этих элементов в донных отложениях озер Ишимской степи может быть обусловлено общим источником, и их депонирование в донных отложениях происходит схожим образом. Обратная корреляция содержания урана с содержанием SiO_2 согласуется с солевой дефляцией озер, которая вызывает вынос органической и глинистой

Таблица 5. *Содержание U, Th и тяжелых металлов (г/т) в донных отложениях соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан)*

Table 5. *U, Th and trace elements concentrations (ppm) in the sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan)*

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V	91	33	55	100	67	50	89	54	20
Co	14	5,9	9,8	15	10	13	14	9,0	3,7
Ni	42	18	24	55	49	53	24	46	15
Cu	57	107	50	154	67	85	43	79	34
Zn	119	122	71	198	110	113	72	100	56
Th	7,0	3,2	8,1	7,7	5,8	4,8	4,8	6,3	1,2
U	3,0	1,3	1,7	3,3	2,6	1,7	1,6	1,9	0,78
Th/U	2,3	2,5	4,7	2,3	2,2	2,8	3,3	2,9	1,5

Примечание. № проб отвечают табл. 1. Литологический состав проб: 1, 4 – черные суглинки, обогащенные органикой и ураном (выделены серым цветом); 2, 3, 5–9 – засоленные песчаники, обедненные органикой и ураном.

Note. No. of the samples are identical to those in the table 1. Lithological composition of the samples: 1, 4 are the organic- and uranium-rich black loams (emphasized by gray color); 2, 3, 5–9 are the organic- and uranium-depleted salt sandstones.

фракций, что приводит к опесчаниванию приповерхностного слоя донных отложений и их обеднению ураном и тяжелыми металлами.

Формы нахождения урана. Для определения степени подвижности и характера связывания ура-

на различными минералами донных осадков соленых озер Ишимской степи были проведены экспериментальные работы по определению форм нахождения урана методом ступенчатого выщелачивания, в основу которого положена концепция, изложенная в работе [15]. Согласно полученным данным (табл. 6) доминирующим механизмом связывания урана донными осадками является взаимодействие растворенной в воде формы шестивалентного урана (уранила) с гидроксидными формами железа (III). Взвесь гидроксидов железа переводит UO_2^{2+} из раствора в твердую фазу за счет высокой сорбционной способности. При этом происходит образование поверхностных комплексов по схеме:

$$-FeOH + UO_2^{2+} \rightarrow -FeOHUO_2^{2+}$$

$$-FeOH + UO_2^{2+} + H_2O \rightarrow -FeOHUO_3 + 2H^+$$

Присутствие железа в озерных осадках усиливает их сорбционный потенциал, однако процесс сильно зависит от pH водной фазы [17–20]. Экспериментально показано, что оптимальным является диапазон pH 5,5–8,2, в который входят показатели pH исследуемых озер Ишимской степи (табл. 2).

Таблица 6. *Формы нахождения урана в донных отложениях соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан)*

Table 6. *Uranium bounding fractions in the sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan)*

№	U, г/т (ppm)	Формы связывания урана Uranium bounding fractions, %					
		Водорастворимая Soluble	Обменная Exchangeable	Карбонатная Carbonate	Гидроксидная Hydroxide	Органическая Organic	Остаток Residue
1	3,0	1,3	11	3,3	53	29	2,4
2	1,3	8,5	5,0	18	27	9,8	32
3	1,7	1,5	0,1	14	42	20	22
4	3,3	1,8	6,6	6,0	62	9,4	14
5	2,6	3,8	5,4	9,7	55	11	15
6	1,7	2,7	7,8	9,9	28	21	31
7	1,9	1,3	9,0	7,2	39	18	25
8	1,6	0,5	11	6,0	33	20	29
9	0,78	3,6	3,8	32	27	9,6	24

Примечание. № проб отвечают табл. 1. Литологический состав проб: 1, 4 – черные суглинки, богатые органикой и обогащенные ураном (выделены серым цветом); 2, 3, 5–9 – засоленные песчаники, обедненные органикой и ураном.

Note. No. of the samples are identical to those in the table 1. Lithological composition of the samples: 1, 4 are the organic- and uranium-rich black loams (emphasized by gray color); 2, 3, 5–9 are the organic- and uranium-depleted salt sandstones.

Обменный механизм связывания растворенного урана осуществляется за счет присутствия в осадках глинистой фракции (каолинита, монтмориллонита и т. д.) [21]. По данным рентгеноструктурного анализа (табл. 4), практически во всех осадках присутствует монтмориллонит в высокодисперсном состоянии. Вероятнее всего, уран внедряется в межслоевое пространство структуры глин, вытесняя или обмениваясь на катионы Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+. Органические формы осадков изученных озер также могут осаждать растворенный уран. Основными компонентами органической составляющей донных осадков, обладающими сорбционными свойствами в отношении урана, являются гуминовые вещества. Отметим также, что методом ИК-спектрометрии (авторские неопубликованные данные) в исследуемых осадках установлено появление набора характеристических полос поглощения, позволяющих дифференцировать гуминовые кислоты, которые могут выступать в роли восстановительного барьера для осаждения урана [22–23].

Геохимическая модель. Происхождение бессточных котловин Ишимской степи, к которым приурочены изученные высокоминерализованные озера с промышленными запасами мирабилита, галита, соды и гипса, до сих пор остается дискуссионным. Большинство исследователей (Л.С. Берг, Б.А. Федорович и др. [10–13]) предполагали, что ведущим фактором происхождения озерных котловин является «солевое выветривание» пород – разрыхление поверхностного интенсивно засоленного слоя. Углубление котловин с позиции этой модели связано с дефляцией в условиях аридного климата, вызывающего периодические усыхания озерных бассейнов. Согласно другой точке зрения (Н.В. Пятакова [14]), образованию крупных озер предшествовали размывы широкими временными потоками, проложившими себе путь с Казахского нагорья до долины р. Иртыша в среднечетвертичное время. С позиции этой модели, в древних руслах и долинах наметились переуглубленные участки, на месте которых затем образовались крупные соленые озера.

Черные суглинки, обнаруженные в озерах Калибек и Улькен-Карой, вероятнее всего, отвечают первичному составу донных отложений, заполняющих озерные котловины. При их формировании главную роль в поглощении урана из водной фазы играли высокодисперсные формы гидроксидов железа и в меньшей степени – глинистая, гумусная и карбонатная фракции. Эти данные согласуются с экспериментальными данными по высокой сорбции урана железосодержащими минеральными фазами как в природных озерно-болотных системах [22], так и в техногенных урановых хвостохранилищах [23–25].

Проведенные гидрогеохимические исследования свидетельствуют, что главным регулятором аккумуляции и перераспределения урана в системе «вода – донные осадки» в замкнутых озерных котловинах Ишимской степи являются процессы интенсивной солевой дефляции, вызывающие вынос органической и глинистой фракций и, как следствие, – опесчанивание прибрежных отложений, а в случае интенсивного усыхания озер – всей площади приповерхностного слоя донных отложе-

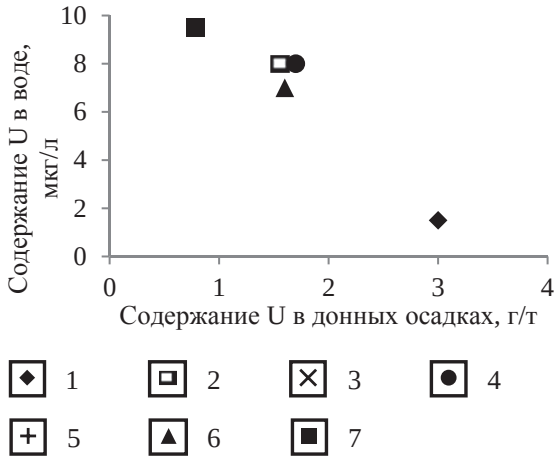


Рис. 4. *Поведение урана в системе «вода – донные отложения» соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан). Условные обозначения: 1 – оз. Калибек, 2 – оз. Киши-Карой, 3 – оз. Улькен-Карой, 4 – оз. Теке, 5 – оз. Селетытениз, 6 – оз. Кызылкак, 7 – оз. Жалаулы*

Fig. 4. *Uranium behavior in the «water–sediments» system of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan). Lakes: 1 – Kalibek, 2 – Kishi-Karoy, 3 – Ulken-Karoy, 4 – Teke, 5 – Seletyteniz, 6 – Kyzylkak, 7 – Zhalauly*

ний. Система «водный резервуар – приповерхностный слой донных отложений» сейчас, вероятнее всего, находится в квазистационарном состоянии обмена ураном, что подтверждается обратными корреляционными зависимостями его содержания в воде и донных осадках (рис. 4). Обращает на себя внимание относительно высокий вклад (53–62 %) гидроксидных форм связывания урана в черных суглинках, что согласуется с моделью солевой приповерхностной дефляции донных осадков (рис. 5).

Основные выводы

1. Исследование образцов воды показало, что соленые озера бессточных котловин Ишимской степи обладают высокой минерализацией (TDS=314–370 г/л) и представлены хлоридно-натриевым и натриево-магниевым гидрохимическими типами, для которых характерны низкие содержания урана (1,5–9,5 мкг/л).
2. Содержания радиоактивных элементов в воде (U=1,5–9,5 мкг/л, Th<0,5 мкг/л) и в приповерхностном слое донных отложений (U=0,78–3,3 г/т, Th=1,2–8,1 г/т, Th/U=1,5–4,7) не превышают фоновый уровень, характерный для бессточных водоемов Западной Сибири. Это позволяет оценить Ишимскую степь как экологически безопасный регион, пригодный для сельскохозяйственного освоения и лечебно-профилактического использования илов.
3. Главным фактором перераспределения урана в замкнутых озерных котловинах Ишимской степи являются процессы интенсивной солевой дефляции, вызывающей опесчанивание озер и, как следствие, обеднение ураном приповерхностного слоя донных отложений.

Исследование выполнено в рамках программы НИР подготовки аспирантов ИГМ СО РАН, программы повышения конкурентоспособности ТГУ, а также при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-17-10003).

Авторы признательны д.х.н. В.П. Исупову, д.г.-м.н. О.Л. Гаськовой и к.г.-м.н. М.Н. Колпаковой за обсуждение поставленных проблем, а также к.г.-м.н. Н.Г. Кармановой и д.г.-м.н. Э.П. Солочиной за проведение аналитических исследований (РФА и РСА). Особую благодарность авторы выражают Л.В. Куйбиде, В.В. Хлестову и О.П. Герасимову за помощь в проведении экспедиционных работ.

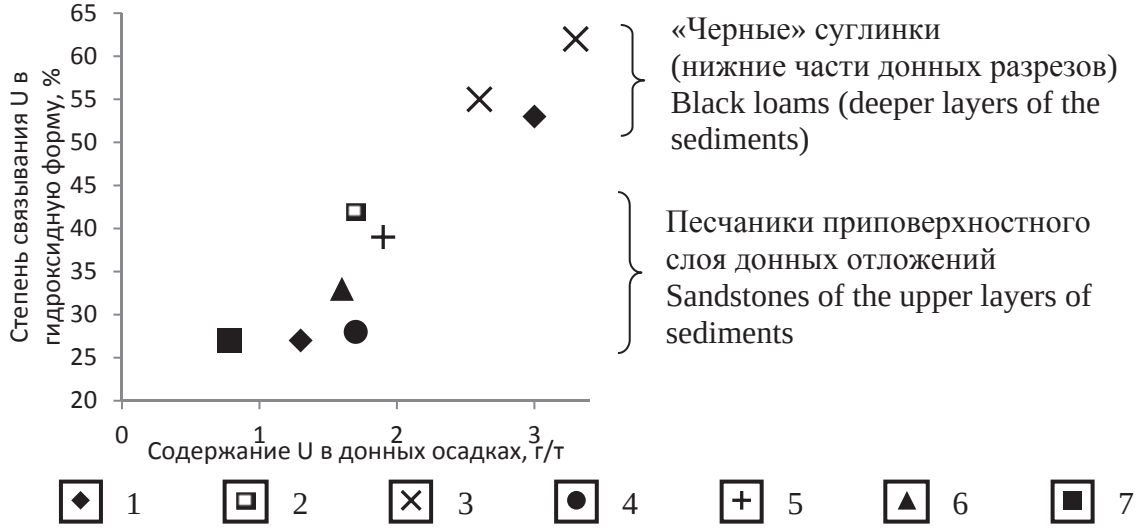


Рис. 5. *Корреляция между степенью связывания урана в гидроксидную форму и содержанием урана в донных отложениях озер Ишимской степи (Северный Казахстан). Условные обозначения: 1 – оз. Калибек, 2 – оз. Киши-Карой, 3 – оз. Улькен-Карой, 4 – оз. Теке, 5 – оз. Селетытениз, 6 – оз. Кызылкак, 7 – оз. Жалаулы*

Fig. 5. *Correlation between hydroxide bounded uranium percentage and uranium concentrations in the Ishim plain lake sediments (Northern Kazakhstan). Lakes: 1 – Kalibek, 2 – Kishi-Karoy, 3 – Ulken-Karoy, 4 – Teke, 5 – Seletyteniz, 6 – Kyzylkak, 7 – Zhalauly*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов А.Ю. Уран и торий в донных отложениях непроточных водоемов юга Томской области // Известия Томского политехнического университета. Серия: Науки о Земле. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 159–165.
2. Геохимическая модель накопления урана в озере Шаазгай-Нур (Северо-Западная Монголия) / В.П. Исупов, С. Ариунбилэг, Л.И. Разворотнева, Н.З. Ляхов, С.Л. Шварцев, А.Г. Владимиров, М.Н. Колпакова, С.С. Шацкая, Л.Э. Чупахина, Е.Н. Мороз, Л.В. Куйбида // ДАН. – 2012. – Т. 447. – № 6. – С. 1–6.
3. Thermodynamic model of uranium and arsenic accumulation in saline lakes / O. Gaskova, V. Isupiov, A. Vladimirov, S. Shvartsev // Acta Geologica Sinica. – 2014. – V. 88. – P. 135–136.
4. Термодинамическая модель поведения урана и мышьяка в минерализованном озере Шаазгай-Нуур (Северо-Западная Монголия) / О.Л. Гаськова, В.П. Исупов, А.Г. Владимиров, С.Л. Шварцев, М.Н. Колпакова // ДАН. – 2015. – Т. 465. – № 2. – С. 203–207.
5. Эколого-геохимическая оценка соляных озер Алтайского края / Г.А. Леонова, А.А. Богуш, В.А. Бобров, В.А. Бычинский, Л.Б. Трофимова, Ю.И. Маликов // География и природные ресурсы. – 2007. – № 1. – С. 51–59.
6. Ландшафтно-геохимические особенности распределения тяжелых металлов в биологических объектах и донных отложениях озер Алтайского края / Г.А. Леонова, Г.Н. Аношин, В.А. Бычинский, Б.Л. Щербов, В.Д. Страховенко // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 12. – С. 1080–1092.
7. Водоемы Алтайского края: биологическая продуктивность и перспективы использования / под ред. В. Соловова. – Новосибирск: Наука, 1999. – 285 с.
8. Geochemical features of Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan) / A.V. Karpov, A.G. Vladimirov, S.K. Krivonogov, I.V. Nikolaeva, E.N. Moroz // Proc. of the 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference. – Novosibirsk, Russia, 13–24 June 2016. – P. 86–87.
9. Выбор способа подземно-скважинного выщелачивания урана на месторождении Семизбай / Г.А. Садырбаева, К.А. Мырзабек, Е.Е. Жатканбаев, С.Д. Дауренбеков, Э.А. Пирматов, Ю.Г. Никитина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 11. – С. 216–222.
10. Волков И.А. Ишимская степь. Рельеф и покровные лессовидные отложения. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1965. – 74 с.
11. Волков И.А., Волкова В.С., Задкова И.И. Покровные лессовидные отложения и палеогеография юго-запада Западной Сибири в плиоцен-четвертичное время. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1969. – 332 с.
12. Стратиграфия СССР. Четвертичная система (полутом 2) / под ред. И. Краснова. – М.: Недра, 1984. – 556 с.
13. Рельеф Западно-Сибирской равнины / А.А. Земцов, Б.В. Мизеров, В.А. Николаев, В.Л. Суходровский, Н.П. Белецкая, А.Г. Гриценко, И.В. Пилькевич, Д.А. Синельников. – Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1988. – 192 с.
14. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Объяснительная записка. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 265 с.
15. Tessier A., Cambell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals // Analytical Chemistry. – 1979. – V. 51. – № 7. – P. 256–273.
16. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер Сибири / В.Д. Страховенко, Б.Л. Щербов, И.Н. Маликова, Ю.И. Восель // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 11. – С. 1501–1514.
17. Ho C.H., Doern D.C. The sorption of uranyl species on a hematite sol // Can. J. Chem. – 1985. – V. 63. – P. 1100–1104.
18. Payne T.E., Davis J.A., Waite T.D. Uranium retention by weathered schists – the role of iron minerals // Radiochimica Acta. – 1994. – V. 66/67. – P. 297–303.
19. JE-Hun Jang, Dempsey B.A., Burgos W.D. A model-based evaluation of sorptive reactivities of hydrous ferric oxide and hematite for U (VI) // Environ. Sci. Technol. –2007. – V. 41 (12). – P. 4305–4310.
20. Sherma D.M., Peacock C.L., Hubbard C.G. Surface complexation of U (VI) on goethite (alpha-FeOOH) // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2008. –V. 72 (2). – P. 298–310.
21. Catalano J.G., Brown Jr. G.E. Uranyl adsorption onto montmorillonite: evaluation of binding sites and carbonate complexation // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2005. – V. 69. – P. 2995–3005.
22. Idiz E.F., Carlisle D., Kaplan I.R. Interaction between organic matter and trace metals in uranium rich bog // Applied Geochemistry. – 1986. – V. 1. – P. 573–590.
23. Сорбция урана на геохимических барьерах на основе торфов разного генезиса / Л.И. Разворотнева, А.Е. Богуславский, В.П. Ковалев, А.В. Бабушкин // Экология промышленного производства. – 2007. – № 3. – С. 33–37.
24. Иммобилизации урана донными осадками соленых озер северо-западной Монголии / Т.И. Маркович, Л.И. Разворотнева, В.П. Исупов, Л.Г. Гилинская, А.Г. Владимиров // Геология и минеральносырьевые ресурсы Сибири. – 2014. – № 3. – Ч. 2. – С. 93–96.
25. Das S., Essilfie-Dughan J., Hendry M.J. Fate of adsorbed arsenate during phase transformation in the presence of gypsum and alkaline conditions // Chemical Geology. – 2015. – V. 411. – P. 69–80.

Поступила 04.07.2016 г.

Информация об авторах

Карпов А.В., аспирант Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Владимиров А.Г., доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; главный научный сотрудник, профессор геолого-географического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета.

Разворотнева Л.И., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Кривоногов С.К., доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Николаева И.В., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мороз Е.Н., младший научный сотрудник Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

URANIUM AND THORIUM IN SEDIMENTS OF THE ISHIM PLAIN LAKES (NORTHERN KAZAKHSTAN)

Alexander V. Karpov[1],
theblake@mail.ru

Alexander G. Vladimirov[1,2],
vladimir@igm.nsc.ru

Lyudmila I. Razvorotneva[1],
rasvorot@igm.nsc.ru

Sergey K. Krivonogov[1],
s_krivonigov@mail.ru

Irina V. Nikolaeva[1],
inikol@igm.nsc.ru

Ekaterina N. Moroz[1],
ekaterina.n.moroz@gmail.com

[1] V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Akademika Koptyuga avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

[2] National Research Tomsk State University,
36, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The Ishim plain lakes adjoin to the Northern Kazakhstan uranium province suggesting leaching of uranium and trace metals by surface and underground water and their subsequent deposition in the lake sediments. The relevance of the study is caused by the need in ecological assessment of the lakes and their suitability for agricultural use.
***The main aim** of the study is to determine chemical and mineral composition of sediments in the Ishim plain lakes as well as uranium content and deportment in bottom sediments to estimate their ecological safety for agricultural use.*
***The methods used in the study:** subsequent leaching of the sediments, X-ray fluorescence, X-ray diffraction analysis, IR-spectrophotometry, inductively coupled plasma mass spectrometry.*
***The results** of the study showed that concentrations of radioactive elements in the upper layer of the sediments are on background levels (U=0,78–3,3 ppm, Th=1,2–8,1 ppm, Th/U=1,5–4,7). This is representative for the undrained lakes of Western Siberia. The sediments have low uranium, thorium and trace elements concentrations; therefore the Ishim plain is ecologically safe region for agricultural use and use of mud for balneology. The following conclusion is drawn on the basis of the received data: the main factor of accumulation and redistribution of uranium in the Ishim plain lakes is the intensive salt deflation resulting in loss of uranium from the upper layer of the sediments.*

Key words:
Geoecology, hydrogeochemistry, «water–sediments» system, saline lakes, sediments, uranium, thorium, trace metals, Ishim plain, Northern Kazakhstan.

The research was carried out within the R&D program in postgraduate training at IGM SB RAS, and TSU Competitiveness Enhancement Program, within financial support of the Russian Science Foundation (project no. 15–17–10003).

The authors acknowledge the assistance in discussion the issues from Isupov V.P. (Dr. Sc.), Gaskova O.L. (Dr. Sc.), Kolpakova M.N. (Cand. Sc.), and assistance in analytical survey from Karmanova N.G. (Cand. Sc.) and Solochina E.P. (Dr. Sc.). The authors express gratitude to L.V. Kuybida, V.V. Khlestov and O.P. Gerasimov for assistance in field studies.

REFERENCES

1. Ivanov A.Yu. Uranium and thorium in the undrained lakes sediments on the south of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011. vol. 318, no. 1, pp. 159–165. In Rus.
2. Isupov V.P., Ariunbileg S., Razvorotneva L.I., Lyakhov N.Z., Shvartsev S.L., Vladimirov A.G., Kolpakova M.N., Shatskaya S.S., Chupakhina L.E., Moroz E.N., Kuybida L.V. Geochemical model of uranium accumulation in the lake Shaazgay-Nur (Northwestern Mongolia). *Reports of Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 447, no. 6, pp. 1–6. In Rus.
3. Gaskova O., Isupiov V., Vladimirov A., Shvartsev S. Thermodynamic model of uranium and arsenic accumulation in saline lakes. *Acta Geologica Sinica*, 2014, vol. 88, pp. 135–136.
4. Gaskova O.L., Isupov V.P., Vladimirov A.G., Shvartsev S.L., Kolpakova M.N. Thermodynamic model of uranium and arsenic behavior in the saline lake Shaazgay-Nuur (Northwestern Mongolia). *Reports of Russian Academy of Sciences*, 2015, vol. 465, no. 2. pp. 203–207. In Rus.
5. Leonova G.A., Bogush A.A., Bobrov V.A., Bychinskiy V.A., Trofimova L.B., Malikov Yu.I. Ecological and geochemical evalua-

tion of the Altai region saline lakes. *Geography and natural resources*, 2007, vol. 1, pp. 51–59. In Rus.
6. Leonova G.A., Anoshin G.N., Bychinskiy V.A., Shcherbov B.L. Strakhovenko V.D. Landshaftno-geokhimicheskie osobennosti raspredeleniya tyazhelylh metallov v biologicheskikh obektakh i donnykh otlozheniyakh ozer Altayskogo kraya [Landscape and geochemical features of trace metals distribution in biological objects and lake sediments of Altai region]. *Geology and geophysics*, 2002, vol. 43, no. 12, pp. 1080–1092.
7. Solovyov V.P. *Vodoemy Altayskogo kraya: biologicheskaya produktivnost i perspektivy ispolzovaniya* [Lakes of Altai region: biological productivity and perspectives of use]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1999. 285 p.
8. Karpov A.V., Vladimirov A.G., Krivonogov S.K., Nikolaeva I.V., Moroz E.N. Geochemical features of Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan). Proc. of the 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference. Novosibirsk, Russia, 13–24 June 2016. pp. 86–87.
9. Sadyrbaeva G.A., Myzarbek K.A., Zhatkanbaev E.E., Daurenbekov S.D., Pirmatov E.A., Nikitina Yu.G. The way of insitu uranium leaching selection at Semyz-bay deposit. *Mining informational and analytical bulletin*, 2011, no. 11, pp. 216–222. In Rus.
10. Volkov I.A. *Ishimskaya step. Relef i pokrovnye lessovidnye otlozheniya* [Ishim steppe. Relief and integumentary loess-like sediments]. Novosibirsk, SB of AS USSR Publ., 1965. 74 p.
11. Volkov I.A., Volkova V.S., Zadkova I.I. *Pokrovnye lessovidnye otlozheniya i paleogeografiya yugo-zapada Zapadnoy Sibiri v ploitsen-chetvertichnoe vremya* [Integumentary loess-like sediments and paleogeography of the southwest Western Siberia in pliocheene-quaternary period]. Novosibirsk, Nauka SB Publ., 1969. 332 p.
12. Krasnov I.I. *Stratigrafia SSSR. Chetvertichnaya sistema (polutom 2)* [Stratigraphy of USSR. Quaternary system (semivolume 2)]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 556 p.
13. Zemtsov A.A., Mizerov B.V., Nikolaev V.A., Sukhodrovskiy V.L., Beletskaya N.P., Gritsenko A.G., Pilkevich I.V., Sinelnikov D.A. *Relef Zapadno-Sibirskoy ravniny* [Relief of the Western Siberia plain]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988. 192 p.
14. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:1000000. Obyasnitelnaya zapiska* [State geological map of the USSR of 1:1000000 scale. Explanatory note]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962. 265 p.
15. Tessier A., Cambell P.G.C., Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. *Analytical Chemistry*, 1979, vol. 51, no. 7, pp. 256–273.
16. Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel Yu.I. The regularities of distribution of radionuclides and rare-earth elements in bottom sediments of siberian lakes. *Geology and geophysics*, 2010, vol. 51, no. 11, pp. 1501–1514. In Rus.
17. Ho C.H., Doern D.C. The sorption of uranyl species on a hematite sol. *Can. J. Chem*, 1985, vol. 63, pp. 1100–1104.
18. Payne T.E., Davis J.A., Waite T.D. Uranium retention by weathered schists – the role of iron minerals. *Radiochimica Acta*, 1994, vol. 66/67, pp. 297–303.
19. JE-Hun Jang, Dempsey B.A., Burgos W.D. A model-based evaluation of sorptive reactivities of hydrous ferric oxide and hematite for U (VI). *Environ. Sci. Technol*, 2007, vol. 41 (12), pp. 4305–4310.
20. Sherma D. M., Peacock C. L., Hubbard C. G. Surface complexation of U (VI) on goethite (alpha-FeOOH). *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2008, vol. 72 (2), pp. 298–310.
21. Catalano J.G., Brown Jr. G.E. Uranyl adsorption onto montmorillonite: evaluation of binding sites and carbonate complexation. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2005, vol. 69, pp. 2995–3005.
22. Idiz E.F., Carlisle D., Kaplan I.R. Interaction between organic matter and trace metals in uranium rich bog. *Applied Geochemistry*, 1986, vol. 1, pp. 573–590.
23. Razvorotneva L.I., Boguslavskiy A.E., Kovalev V.P., Babushkin A.V. Sorbtsiya urana na geokhimicheskikh barerakh na osnove torfov raznogo genezisa [Uranium sorption on geochemical barriers based on different genesis peats]. *Ecology of industrial production*, 2007, no. 3. pp. 33–37.
24. Markovich T.I., Razvorotneva L.I., Isupov V.P., Gilinskaya L.G., Vladimirov A.G. Immobilizatsiya urana donnymi osadkami solenykh ozer severo-zapadnoy Mongolii [Uranium immobilization by sediments of the northwest Mongolia saline lakes]. *Geology and mineral resources of Siberia*, 2014, no. 3, P. 2, pp. 93–96.
25. Das S., Essilfie-Dughan J., Hendry M.J. Fate of adsorbed arsenate during phase transformation in the presence of gypsum and alkaline conditions. *Chemical Geology*, 2015, vol. 411, pp. 69–80.

Received: 4 July 2016.

Information about the authors

Alexander V. Karpov, postgraduate student, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Alexander G. Vladimirov, Dr. Sc., professor, chief research worker, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; chief research worker, professor, National Research Tomsk State University.

Lyudmila I. Razvorotneva, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Sergey K. Krivonogov, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Irina V. Nikolaeva, Cand. Sc., senior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Ekaterina N. Moroz, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.