

УДК 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ УРАНА В РУСЛЕ РЕКИ СЕМИЗБАЙ (СЕВЕРО-КАЗАХСТАНСКАЯ УРАНОВОРУДНАЯ ПРОВИНЦИЯ)

Карпов Александр Викторович¹,
akarпов@igm.nsc.ru

Гаськова Ольга Лукинична¹,
gaskova@igm.nsc.ru

Владимиров Александр Геннадьевич¹

Анникова Ирина Юрьевна¹,
iyannikova@mail.ru

Мороз Екатерина Николаевна¹,
ekaterina.n.moroz@gmail.com

¹ Институт Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

Актуальность исследования состоит в необходимости поиска дешёвых источников урана вблизи потенциальных ураново-рудных зон Северного Казахстана на основе изучения современных процессов миграции и накопления урана.

Цель: построение геохимической модели выщелачивания, миграции и накопления урана в русле реки Семизбай на основе определения состава воды и донных отложений в речных и озерных резервуарах, а также состава гранитов Жаман-Койтасского массива и коры выветривания как коренного источника урана при его выщелачивании.

Объекты: современная кора выветривания по лейкогранитам восточной части Жаман-Койтасского массива; русловое отложение рек Семизбай и его притока Шат; прирусловое ключевые, речные и озерные воды рек Семизбай, Селеты и озера Жамантуз; донные отложения озера Жамантуз.

Методы: рентгенофлуоресцентный анализ, масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, рентгеноструктурный анализ, классические методы определения катионно-анионного состава воды.

Результаты. Определены высокие содержания урана в ключевых прирусловых водах (0,32 мг/л) и водах водохранилища (0,047 мг/л), а также повышенные содержания урана в прирусловых почвах (8,6–13 г/т) и донных отложениях водохранилища (23–24 г/т) в верхнем течении реки Семизбай. На основании полученных данных предложена модель выщелачивания урана из лейкогранитов Жаман-Койтасского массива, его миграции и накопления в русле реки Семизбай, современные фации которой являются геохимическим барьером на пути распространения урана в экосистему Ишимской степи. Концентрация урана в русловых отложениях нижнего течения реки (1,9–2,7 г/т), в воде (0,0029 мг/л) и донных отложениях (4,6 г/т) озера Жамантуз, являющегося конечным сточным водоемом для реки Семизбай, отвечает фоновым содержаниям урана, характерным для Западной Сибири.

Ключевые слова:

Жаман-Койтасский массив, река Семизбай, миграция урана, геохимическая модель, Северный Казахстан, Ишимская степь.

Введение

Гидрогенными месторождениями урана являются рудные объекты, которые сформированы грунтовыми и/или пластовыми низкотемпературными водами, обогащенными ураном и сопутствующими элементами. Они распространены на всех континентах мира в проницаемых осадочных и вулканогенных отложениях от конца палеозоя до кайнозоя включительно. Этим промышленным урановым месторождениям принадлежит одно из первых мест в мире по запасам урана. В зарубежной литературе гидрогенные месторождения урана относятся преимущественно к песчаниковому типу, в котором выделяется несколько типов по морфологии оруденения и характеру восстановителя [1]. Поиски и разведка таких месторождений урана являются приоритетными, поскольку технология их эксплуатации методом подземного скважинного выщелачивания рентабельна, а извлекаемые руды находятся в низкой ценовой категории [2].

Экзогенно-эпигенетическое месторождение Семизбай, открытое в семидесятые годы прошлого века, является единственным промышленным ураново-рудным объектом гидрогенного типа в осадочных породах на сопряжении северо-восточной окраины Казахского щита и Западно-Сибирской плиты Урало-Сибирской эпипалеозойской платформы [3]. Непосредственный интерес к изучению этих объектов и территорий вызывают прогнозные данные, по которым южное обрамление Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции считается перспективным на обнаружение крупных урановых месторождений [4].

Одним из главных механизмов формирования месторождений песчаникового типа является осаждение урана из окислительных подземных вод на восстановительном барьере, представляющем собой водопроницаемые песчаники, обогащенные органикой, сульфидами, а также углеводородами и другими восстановителями [2]. Тем не менее механизмы образования отдельных месторождений могут быть комплексными

и многоэтапными в зависимости от конкретных геологических и гидрогеохимических условий. Коренным источником урана на месторождениях песчаникового типа являются подстилающие кристаллические породы, гранитоиды, а также уже существующие месторождения урана [5]. В этом отношении большой интерес для изучения представляют речные и замкнутые озерно-речные системы, в пределах водосбора которых располагаются гранитные массивы и урановые рудопроявления. В Северном Казахстане одним из таких примеров является система «Жаман-Койтасский массив – река Семизбай – озеро Жамантуз», расположенная на границе Северо-Казахстанской урановорудной провинции и Ишимской степи. Поэтому нами проведено тщательное гидрохимическое опробование этих объектов и предложена геохимическая модель накопления урана в современном русле реки Семизбай.

Целью работы является исследование воды и донных отложений в искусственном водохранилище и соленом озере Жамантуз, а также коренных выходов гранитов и коры выветривания, расположенных в пределах водосборной площади реки Семизбай и построение геохимической модели накопления урана на геохимических барьерах для продолжения и оптимизации поисков и разведки новых зон рудных залежей на рудном поле месторождения, а также в других однотипных бассейнах РФ и сопредельных государств.

Геологическая позиция

Исток и верховье реки Семизбай находятся в восточной части Жаман-Койтасского гранит-лейкогранитного интрузивного массива, который следует рассматривать как коренной источник урана при природном подземном и наземном выщелачивании. В верхнем течении реки Семизбай расположено два искусственных водохранилища – Кумдыколь и Семизбай. Последнее представляет собой водный резервуар (длина до 400 м, ширина до 50 м, глубина до 3 м), где в настоящее время происходит накопление урана в воде и донных осадках в естественных условиях за счет выщелачивания гранитного субстрата (рис. 1). В нескольких километрах от русла, в нижнем течении реки, где гранитный массив уже перекрыт мезозойско-кайнозойскими отложениями платформенного чехла Западно-Сибирской плиты, активно эксплуатируется экзогенно-эпигенетическое урановое месторождение Семизбай песчаникового типа [3, 6]. Конечный водоем озерно-речной системы представлен бессточным высокоминерализованным озером Жамантуз, расположенным в Ишимской степи (рис. 1, А, Б). В настоящее время река Семизбай является пересыхающей. Постоянное наличие воды наблюдается только в верхнем течении реки и водохранилищах. Русло реки Семизбай и его притока – реки Шат – наполняется водой главным образом за счет атмосферных осадков и во время весеннего половодья, сток осуществляется в восточном – северо-восточном направлении.

Следует отметить, что месторождение Семизбай находится в верхнеюрско-нижнемеловой карбонатно-глинисто-алевролитовой толще, вскрытой в бортах од-

ноименной речной палеодолины. В геоморфологическом плане месторождение расположено непосредственно на границе Казахского мелкосопочника и Ишимской степи. Эта граница, судя по геолого-геофизическим данным, отвечает резкой ступени погружающегося фундамента Западно-Сибирской плиты и имеет сложное блоковое строение. Семизбайская свита (J_3-K_1), в пределах которой сосредоточено урановое оруденение, перекрыта меловыми, палеогеновыми и четвертичными отложениями [3, 6]. Одним из ключевых моментов в модели формирования месторождения Семизбай является то, что гранит-лейкограниты Жаман-Койтасского массива являлись коренным источником урана на этом месторождении при его выщелачивании из мезозойской коры выветривания. Это подтверждается геохронологическими и геохимическими данными, а также согласуется с современными представлениями о механизмах формирования урановых месторождений песчаникового типа [2, 4, 6].

Объекты и методы исследования

Исследование воды и донных отложений в искусственном водохранилище и соленом озере Жамантуз, а также коренных выходов гранитов и коры выветривания, расположенных в пределах водосборной площади реки Семизбай, было проведено в ходе международной междисциплинарной Российско-Казахстанской гидрогеохимической экспедиции 2016 г. Положение точек отбора проб приведено на космоснимках (рис. 1, Б, В). Каталог отобранных образцов приведен в табл. 1. Проведенные региональные геохимические исследования дополняют общую картину распределения урана в Западной Сибири [8–13].

Образцы гранитов были представлены сколками весом 200–400 г. Отквартованная часть (50 г) истерта до 200 меш для последующего анализа. Пробы аркоз и почв из коры выветривания массой около 300 г были отобраны в холщовые мешки. Пробы русловых и донных озерных отложений массой около 100–200 г были отобраны в пластиковые контейнеры.

Отбор проб воды проводился в летний засушливый период. Для определения катионно-анионного состава воду отбирали с глубины 30–40 см в пластиковые бутылки объемом 1,5 л. pH и Eh определяли на месте при помощи водонепроницаемого прибора HI98121 фирмы Hanna Instruments на глубине отбора проб. Пробы воды для определения микроэлементов отбирали в пластиковые бутылки объемом 0,5 л и подкисляли 2 мл концентрированной азотной кислоты марки «ос.ч.», перегнанной дважды на установке DuoPure фирмы MileStone.

Определение макрокомпонентного состава и общей минерализации (TDS) выполнены в научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра «Вода» ИПР ТПУ (г. Томск) с использованием стандартных методик анализа.

Микроэлементный состав воды определяли методом ИСП-МС в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия).

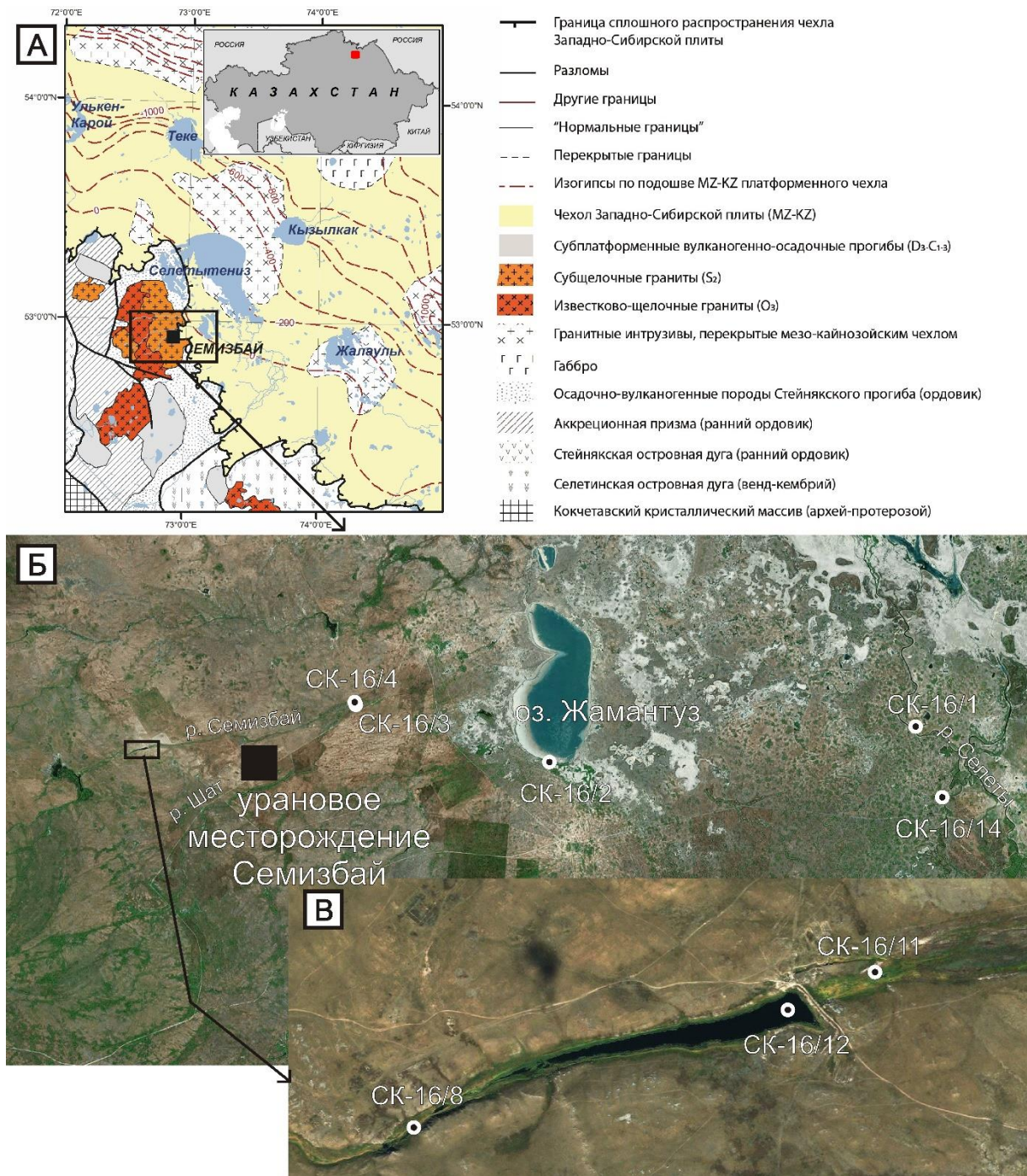


Рис. 1. Геологическая привязка проб воды и донных осадков в русле реки Семизбай и озере Жамантуз, Северный Казахстан: А) тектоническая схема области сочленения Стейнякского сегмента каледонид Северного Казахстана (Казахский мелкосопочник) и платформенного чехла Западно-Сибирской плиты (Ишимская степь). Составлена А.Г. Владимировым, С.К. Кривоноговым и А.В. Карповым по материалам государственных геологических карт СССР масштаба 1:1000000, 1:200000, фрагмент листа N-43 (Омск) [7]; Б) спутниковый снимок водосборной площади реки Семизбай. На снимке вынесены точки отбора проб гранитов, воды и донных осадков, а также месторасположение уранового месторождения Семизбай песчаникового типа; В) спутниковый снимок искусственного водохранилища в верхнем течении реки Семизбай

Fig. 1. Geological scheme and water and bottom sediment samples locations in the Semizbay riverbed and Zhamantuz lake, Northern Kazakhstan: A) tectonic scheme of the Stepiyakov segment of the Northern Kazakhstan caledonides (Kazakh uplands) and platform cover of the Western Siberian plate (Ishim steppe). Made by A.G. Vladimirov, S.K. Krivonogov and A.V. Karpov with the use of state geological maps of USSR 1:1000000, 1:200000, list fragment N-43 (Omsk) [7]; Б) satellite image of the Semizbay river catchment area. Sampling locations of granite, water and bottom sediment samples as well as location of the sandstone type Semizbay uranium deposit are shown; В) satellite image of the artificial reservoir in upper course of the Semizbay river

Таблица 1. Каталог коллекции проб гранитов, коры выветривания, донных и русловых отложений и воды по трансекту «гранитный массив – русловые отложения – озеро Жамантуз»

Table 1. Catalog of granite, weathering crust, bottom and riverbed sediments and water samples on transect «granite massif – riverbed sediments – Zhamantuz lake»

Объект Object	№ образцов Sample no.	Содержание урана Uranium content	
		порода, г/т rock, ppm	вода, мг/л water, mg/l
Верхнее течение р. Семизбай и её притока Шат Upper course of the Semizbay river and its tributary Shat river			
<i>Жаман-Койтаасский массив/Zhaman-Koytass massif</i>			
γ_1 биотит-амфиболовые гранит-лейкогранит γ_1 biotite-amphibole granite-leucogranite porphyry	СК-16/5-1, СК-16/10-3, СК-16/61, СК-16/62, СК-16/63	2,7–5,4	–
$\gamma_2^{1\text{ф}}$ – порфиroidные биотитовые лейкограниты $\gamma_2^{1\text{ф}}$ – porphyry-like biotite leucogranites	СК-16/9, СК-16/10-1, СК-16/10-2	3,3–4,8	–
A_3 – аплиты/ A_3 – aplites	СК-16/7, СК-16/12-1	2,4–6,4	–
<i>Кора выветривания по гранитам 1 фазы (γ_1)/Weathering crust on the 1 phase granites (γ_1)</i>			
Зона выщелачивания по гранитам 1 фазы (γ_1) Leaching zone on the 1 phase granites (γ_1)	СК-16/5-2, СК-16/5-3	4,6–6,6	–
Аркозы/Arkose	СК-16/5-4	2,7	–
Почвы/Soil	СК-16/5-5	2,3	–
<i>Кора выветривания по лейкогранитам 2 фазы ($\gamma_2^{2\text{ф}}$)/Weathering crust on the 2 phase leucogranites ($\gamma_2^{2\text{ф}}$)</i>			
Аркозы, аркозовые песчаники Arkose, arkosic sandstones	СК-16/11-2, СК-16/11-3, СК-16/11-4	2,7–10	–
Почвы/Soil	СК-16/11-5, СК-16/11-6	8,6–13	–
<i>Искусственное водохранилище на р. Семизбай/Artificial water reservoir on the Semizbay river</i>			
Донные отложения/Bottom sediments	СК-16/8, СК-16/12	23–24	–
Вода/Water	СК-16/12	–	0,047
<i>Прирусловые ключевые воды р. Семизбай/Spring water in bed of the Semizbay river</i>			
Вода/Water	СК-16/11	–	0,32
Нижнее течение р. Семизбай и р. Шат, оз. Жамантуз Lower course of the Semizbay and Shat rivers, Zhamantuz lake			
<i>р. Шат/Shat river</i>			
Русловые отложения/Riverbed sediments	СК-16/3	1,9	–
<i>р. Семизбай/Semizbay river</i>			
Русловые отложения Riverbed sediments	СК-16/4	2,7	–
<i>оз. Жамантуз/Zhamantuz lake</i>			
Донные отложения (береговой разрез по керну 0,2–1,2 м) Bottom sediments (shore section 0,2–1,2 m core)	СК-16/2-1, СК-16/2-2, СК-16/2-3, СК-16/2-4, СК-16/2-5	3,5–4,6	–
Вода/Water	СК-16/2	–	0,0029
Нижнее течение р. Селеты/Lower course of the Selety river			
<i>р. Селеты/Selety river</i>			
Вода/Water	СК-16/1	–	0,0019
<i>Артезианская скважина возле нижнего течения р. Селеты Artesian well near lower course of the Selety river</i>			
Вода/Water	СК-16/14	–	<0,0001

Пробы центрифугировали в течение 30 мин при 10000 об/мин, после чего разбавляли в 1000 раз водой высокой степени очистки (сопротивление 18,2 МΩ·см), полученной при помощи системы MilliQ фирмы Millipore, с добавлением внутреннего стандарта 1 мкг/л In. Определение концентраций выполнено по внешней градуировке по многоэлементным эталонным растворам.

Определение содержаний петрогенных оксидов выполнено методом рентгенофлуоресцентного анализа в лаборатории рентгеноспектральных методов анализа ИГМ СО РАН (г. Новосибирск). Анализируемую пробу сушили при 105 °С в течение 1 часа, затем прокачивали 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 плавляли 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 других редких элементов в донных отложениях, гранитах и других породах проводили методом ИСП-МС в лаборатории изотопно-аналитической геохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) с использованием масс-спектрометра высокого разрешения ELEMENT фирмы Finnigan Mat (Германия) по стандартной методике [14].

Минеральный состав аркоз, донных осадков и почв определялся рентгеноструктурным методом на дифрактометре ДРОН 3 в лаборатории геологии кайнозой, палеоклиматологии и минералогических индикаторов климата 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.

Результаты и обсуждение

Гранитоиды Жаман-Койтасского массива. Авторами было проведено подробное исследование гранитоидов Жаман-Койтасского массива, результаты которого представлены в отдельной, ещё не опубликованной работе. Было установлено, что восточная часть Жаман-Койтасского массива, сложенная мелко-среднезернистыми биотит-амфиболовыми гранит-лейкогранит порфирами первой интрузивной фазы (γ_1), крупнозернистыми порфирированными биотитовыми лейкогранитами второй интрузивной фазы ($\gamma_2^{r\phi}$) и мелко-тонкозернистыми аплитами (A_3), характеризуется развитием коры выветривания и зон выщелачивания по гранит-лейкогранитам как первой, так и второй интрузивных фаз. Также было обнаружено, что эти лейкограниты характеризуются признаками аутометасоматических изменений, проявленных во вторичных изменениях породообразующих минералов: пелитизации калиевых полевых шпатов, серицитизации и сосюритизации плагиоклазов, хлоритизации биотитов. В табл. 1 приведен диапазон содержания элементов для биотитовых лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$.

По имеющимся данным для гранитоидов Жаман-Койтасского массива сложно дать количественную оценку распределения урана по минералам. Это можно сделать только для циркона – при среднем содержании урана 625 г/т он содержит лишь 4 % урана лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$. Апатит и монацит ещё менее значимы ввиду их малой распространенности (P_2O_5 не более 0,05 %). Учитывая титанит-ильменит-магнетитовую специализацию лейкогранитов $\gamma_2^{r\phi}$, можно предположить, что среди аксессуарных минералов, в которых уран прочно связан в кристаллической решетке, именно они являются его главным резервуаром. Среди породообразующих минералов, в которых уран находится в легковыщелачиваемой форме, главным резервуаром, вероятнее всего, является биотит [15–17]. При этом доля такого урана в лейкократовых и биотитовых гранитах может достигать 20–50 % [15]. Эти данные косвенно указывают на то, что биотитовые лейкограниты $\gamma_2^{r\phi}$ Жаман-Койтасского массива являются благоприятным субстратом для выщелачивания урана. В пользу этого свидетельствуют эндоконтактные зоны выщелачивания, связанные с корой выветривания гранитов, а также генезис уранового месторождения Семизбай, согласно которому предполагается, что гранитоиды Жаман-Койтасского массива являлись коренным источником урана при его выщелачивании в мезозойское время [1, 6].

Таблица 2. Содержание оксидов основных элементов (мас. %), урана и тория (g/t) в гранитах (субстрат) и коре выветривания (N-Q)

Table 2. Major oxide (wt. %), uranium and thorium (ppm) content in granites (substratum) and weathering crust (N-Q)

Объект/Object	$\gamma_2^{r\phi}$	Кора выветривания (N-Q) в русле р. Семизбай Weathering crust (N-Q) in bed of the Semizbay river				
		Арkozy/аркозовые песчаники Arkose/arkosic sandstones			Почва/Soil	
Проба/Sample		СК-16/11-2	СК-16/11-3	СК-16/11-4	СК-16/11-5	СК-16/11-6
Оксид/GPS/Oxide	–	N=52.56.94' E=072.45.73'				
SiO ₂	75,10–75,38	68,78	72,70	72,03	64,87	78,10
TiO ₂	0,18–0,19	0,34	0,24	0,27	0,33	0,19
Al ₂ O ₃	12,26–12,74	12,99	13,83	14,51	9,86	7,53
Fe ₂ O ₃	1,29–2,31	2,80	1,64	1,09	5,38	3,38
MnO	0,05–0,06	0,03	0,05	0,04	0,03	0,03
MgO	0,28–0,33	0,61	0,54	0,33	1,79	0,75
CaO	0,82–0,91	1,05	1,00	0,71	4,57	1,43
Na ₂ O	3,54–3,65	2,04	4,08	3,06	1,16	1,42
K ₂ O	3,97–4,56	4,49	3,97	4,53	2,19	2,19
P ₂ O ₅	0,04–0,05	0,15	0,09	0,07	0,15	0,17
SO ₃	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	0,39	<0,03
ППП/LOI	0,61–0,68	5,62	1,21	2,20	8,65	3,34
Сумма/Sum	99,40–99,90	98,95	99,36	98,81	99,37	98,56
K ₂ O/Na ₂ O	1,12–1,25	2,20	0,97	1,48	1,89	1,54
Rb	77–149	115	81	90	78	66
Sr	121–128	205	287	216	361	306
Ba	482–497	603	934	997	600	619
Th	11,8–18,6	32	18	19	9,4	5,4
U	3,3–4,8	10	2,7	5,6	13	8,6
Th/U	3,6–3,9	3,2	6,8	3,4	0,71	0,62

Верхнее течение реки Семизбай. Современная кора выветривания в бортовом разрезе русла реки Семизбай (рис. 2) представлена зоной выщелачивания по лейкогранитам второй интрузивной фазы $\gamma_2^{r\phi}$, которую надстраивают аркозы и аркозовые песчаники мощно-

стью около 3 м. Эти породы имеют характерную текстуру кварцевого агрегата, сцементированного глинистой матрицей. В нижней части разрез сформирован в обводненных условиях, где аркозы пропитаны черной илистой массой. Для пород этого разреза был выпол-

нен анализ макро- и микроэлементного состава (табл. 2), а также рентгенофазовый анализ минерального состава. Состав аркоз в целом однотипен. Основные фазы представлены кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом. В меньших количествах присутствуют смектит, каолинит, а также примеси слюды, хлорита, амфибола, кальцита, пирита. Верхний слой почвы 20–30 см; между почвой и аркозами располагается слой гальки и связывающий её цемент толщиной до 10 см. Особый интерес представляет распределение урана и тория по вертикали этого разреза. Илистые аркозы нижней части разреза (глубина 3 м) характеризуются

содержанием Th – 32 г/т, U – 10 г/т и соотношением Th/U=3,2. Аркозы средней части разреза (глубина 0,5–1 м) характеризуются более низкими содержаниями Th – 18–19 г/т и U – 2,7–5,6 г/т, соотношением Th/U=3,4–6,8, что соответствует содержаниям Th и U в лейкогранитах ${}_{\gamma_2}^{\text{гф}}$ Жаман-Койтасского массива (табл. 2). В то же время содержание U в верхних слоях почвы достигает 8,6–13 г/т, содержание Th уменьшается до 5,4–9,4 г/т, а соотношение Th/U уменьшается до 0,62–0,71. Повышенные содержания урана в верхних слоях почвы согласуются с появлением гётита в их минеральном составе.

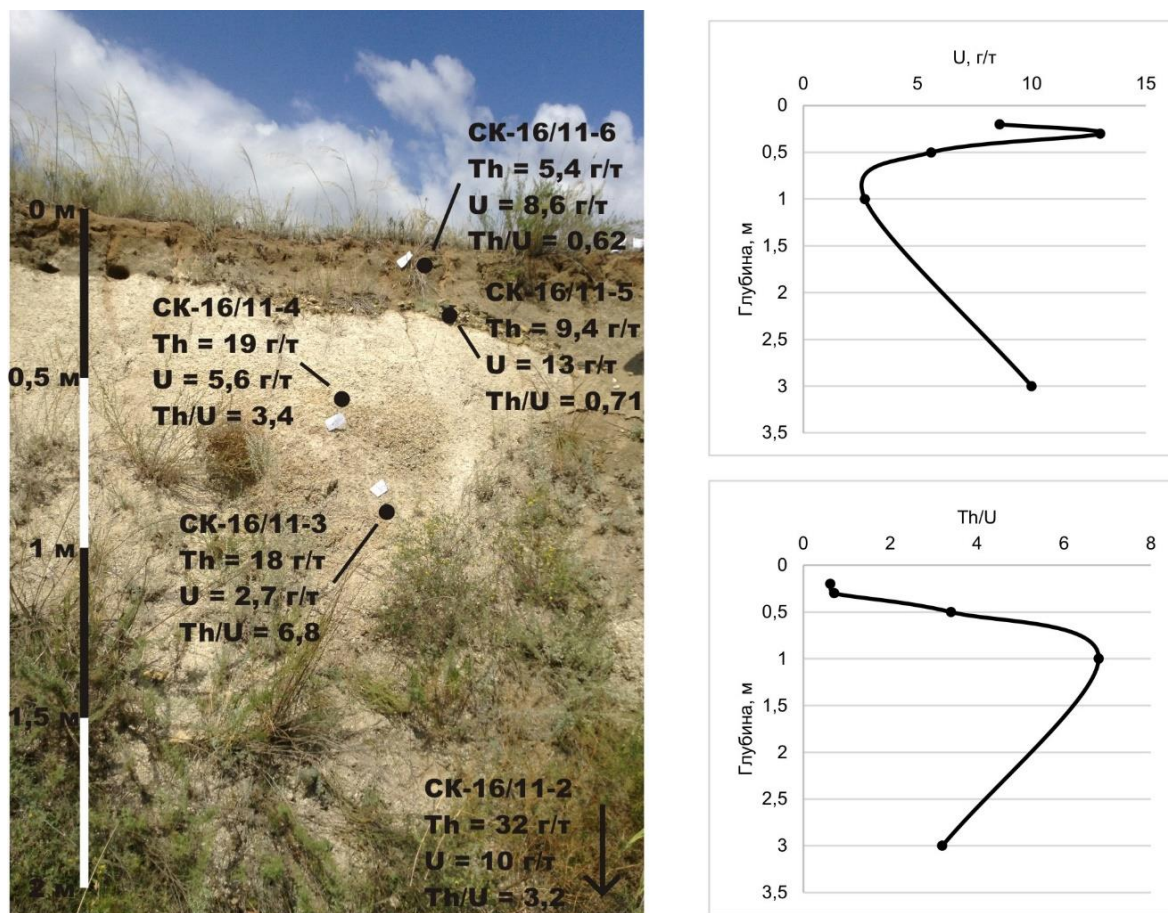


Рис. 2. Фотография коры выветривания (N-Q) в бортовом разрезе русла реки Семизбай и распределение содержания урана и соотношения Th/U по вертикали разреза. SK-16/11-6 – верхний слой почвы, глубина 0,2 м; SK-16/11-5 – галечный цемент, глубина 0,3 м; SK-16/11-4 – аркозы, глубина 0,5 м; SK-16/11-3 – аркозы, глубина 1 м; SK-16/11-2 – илистые аркозы, глубина около 3 м, не показаны на фотографии

Fig. 2. Photo of the weathering crust (N-Q) in board section of the Semizbay riverbed and vertical distribution of uranium content and Th/U ratio. SK-16/11-6 – upper soil layer, 0,2 m depth; SK-16/11-5 – pebble matrix, 0,3 m depth; SK-16/11-4 – arcose, 0,5 m depth; SK-16/11-3 – arcose, 1 m depth; SK-16/11-2 – silt arcose, about 3 m depth, not shown on the photo

Донные отложения искусственного водохранилища на реке Семизбай (верхнее течение) также характеризуются повышенными содержаниями урана (U=23–24 г/т, Th=13–14 г/т) и низкими соотношениями Th/U=0,54–0,61 (табл. 3). В минеральном составе этих отложений обнаруживаются слюда, хлорит, кальцит, следы гипса и гематита, кроме того, они богаты органикой.

Повышенные содержания урана наблюдаются и в водных источниках в верхнем течении реки Семизбай.

Содержание урана в водах искусственного водохранилища в русле реки составляет 0,047 мг/л (табл. 4), что во много раз превышает фоновые содержания урана в природных озерных и речных водах Ишимской степи [10–12], а также средние содержания урана в реках мира [18–20]. Содержание урана в ключевых водах, выходящих на поверхность в русле реки Семизбай, достигает 0,32 мг/л и сравнимо с содержанием урана в ключевых водах вблизи ураноносного озера Шаазгай-Нуур в Северо-

ро-Западной Монголии [21]. При этом необходимо отметить, что в разных регионах мира также отмечаются повышенные содержания урана (более 0,03 мг/л) в подземных водах, связанных с гранитными массивами, а наибольшие значения – в водах, связанных с гидротермально преобразованными гранитоидами [22, 23].

Воды водохранилища и ключевые воды коры выветривания характеризуются слабой соленостью (1,55–2,3 г/л), близким к нейтральному pH=7,7–7,9 и нейтральной, слабоокислительной средой (Eh=–15–119 мВ). По классификации О.А. Алёкина эти воды относятся к Cl-Na II типу.

Таблица 3. Содержание оксидов основных элементов (мас. %), урана, тория и тяжелых металлов (г/т) в донных отложениях водохранилища на р. Семизбай и соленом озере Жамантуз

Table 3. Major oxide (wt. %), uranium, thorium and trace elements (ppm) content in bottom sediments of reservoir on the Semizbay river and the saline lake Zhamantuz

Объект/Object	Водохранилище на р. Семизбай Water reservoir on the Semizbay river		Дельта р. Шат Delta of the Shat river	Русло р. Семизбай (нижнее течение) Semizbay riverbed (lower course)	оз. Жамантуз Zhamantuz lake
Проба/Sample	СК-16/8	СК-16/12	СК-16/4	СК-16/3	СК-16/2-1
Оксид/GPS/Oxide	N=52.56.81' E=072.45.18'	N=52.56.92' E=072.45.69'	N=52.58.31' E=072.57.98'	N=52.58.35' E=072.57.94'	N=52.56.42' E=073.07.71'
SiO ₂	63,59	54,83	81,03	78,85	52,79
TiO ₂	0,55	0,61	0,11	0,16	0,53
Al ₂ O ₃	12,14	11,78	9,30	9,37	10,18
Fe ₂ O ₃	3,59	5,71	1,90	1,98	6,20
MnO	0,05	0,13	0,03	0,04	0,07
MgO	1,17	1,50	0,22	0,35	3,18
CaO	1,34	4,21	0,76	0,83	3,42
Na ₂ O	2,37	1,84	2,44	2,30	5,25
K ₂ O	2,59	2,10	3,23	3,22	1,58
P ₂ O ₅	0,17	0,17	0,05	0,05	0,11
SO ₃	0,27	0,77	<0,03	<0,03	1,82
ППП/LOI	11,63	15,38	0,74	1,66	13,48
Сумма/Sum	99,44	99,02	99,85	98,88	98,59
K ₂ O/ Na ₂ O	1,09	1,14	1,32	1,40	0,30
V	71	75	19	25	106
Cr	45	163	43	40	174
Co	8,9	15	2,5	4,3	21
Ni	23	52	9,4	15	71
Cu	25	47	31	16	55
Zn	64	77	23	25	79
Rb	85	60	77	79	21
Sr	210	325	182	166	157
Ba	540	472	828	709	385
Th	13	14	4,2	3,8	7,6
U	23	24	2,7	1,9	4,6
Th/U	0,54	0,61	1,6	2,1	1,7

Таблица 4. Содержание макро- и микроэлементов (мг/л) в озерных, русловых и ключевых водах

Table 4. Macro- and microelement content (mg/l) in lake, riverbed and spring waters

Объект Object	Ключевые прирус- ловые воды р. Семизбай Spring waters in bed of the Semizbay river	Водохранилище на р. Семизбай Water reservoir on the Semizbay river	оз. Жамантуз (конечный водоём р. Семизбай) Zhamantuz lake (discharge water body of the Semiz- bay river)	р. Селеты Selety river	Артезианская скважина в нижнем течении р. Селеты Artesian well near lower course of the Selety river
Проба Sample	СК-16/11-1	СК-16/12	СК-16/2	СК-16/1	СК-16/14
GPS	N=52.56.98' E=072.46.01'	N=52.56.92' E=072.45.69'	N=52.56.42' E=073.07.71'	N=52.59.84' E=073.26.89'	N=52.55.39' E=073.29.20'
pH	7,87	7,72	7,43	8,39	8,08
Eh, мВ	–15	119	–150	172	–100
TDS	2300	1550	223000	1420	2130
HCO ₃ ⁻	490	380	580	360	750
SO ₄ ²⁻	460	370	9100	200	240
Cl ⁻	620	330	129000	420	450
Ca ²⁺	88	68	20	63	12
Mg ²⁺	67	56	4620	64	9,2
Na ⁺	570	350	79600	305	660
K ⁺	4,0	6,6	160	4,5	5,3
Sr	2,3	1,5	9,8	0,92	0,29
B	0,30	0,05	16	0,41	3,5
Li	0,037	0,038	0,29	0,012	0,016
U	0,32	0,047	0,0029	0,0019	<0,0001

Корреляции между содержанием урана и тория (рис. 3) и низкое соотношение Th/U (ниже, чем в подстилающих их аркозах и гранитах) показывают, что русловые отложения в верхнем течении реки Семизбай обогащены ураном. Его содержание в них в несколько раз превышает содержание в русловых отложениях нижнего течения реки и донных отложениях соленых озер Ишимской степи, включая озеро Жамантуз. Эти

отложения характеризуются низкими фоновыми содержаниями урана, типичными для Западной Сибири [8–13]. Ранее авторами и их коллегами было установлено, что верхние слои донных отложений озер Ишимской степи характеризуются низкими фоновыми содержаниями урана, а процессы накопления и перераспределения урана и тяжелых металлов главным образом контролируются процессами солевой дефляции [10, 11].

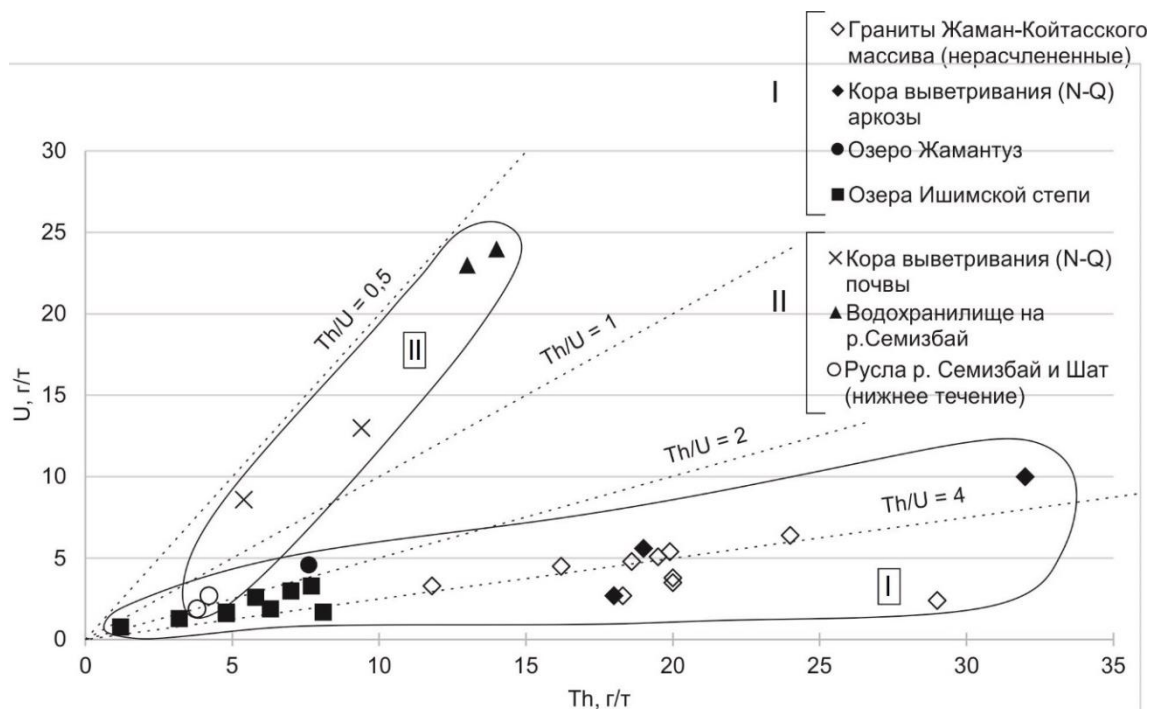


Рис. 3. Корреляция между содержанием урана и тория в русловых отложениях р. Семизбай. I – поле составов донных отложений озера Жамантуз и других соленых озер Ишимской степи, русловых отложений нижнего течения р. Семизбай и Шат, аркоз коры выветривания (N-Q) и гранитов Жаман-Койтасского массива. II – поле составов верхних слоев почвы и русловых отложений верхнего течения р. Семизбай, обогащенных ураном

Fig. 3. Correlation between uranium and thorium content in bed sediments of the Semizbay river. I – field of bottom sediments of the Zhamantuz lake and other lakes of the Ishim steppe, bed sediments of Semizbay and Shat rivers, arcose of the weathering crust (N-Q) and granites of the Zhaman-Koytass massif. II – field of uranium enriched upper soil layers and bed sediments in upper course of the Semizbay river

На основе изложенных выше геологических и гидрогеохимических данных нами предложена геохимическая модель выщелачивания, миграции и накопления урана в воде, русловых отложениях реки Семизбай и соленом озере Жамантуз (рис. 4). Согласно этой модели, лейкограниты ${}_{\text{U}}\gamma_2^{\text{r}\Phi}$ Жаман-Койтасского массива являются коренным источником урана при его выщелачивании из современной коры выветривания. Выщелачивание урана происходит, предположительно, атмосферными осадками, формирующими поверхностный и подземный сток. Вместе с подземными и наземными водами выщелоченный уран переносится ниже по течению реки Семизбай. В местах выхода на поверхность обогащенных ураном ключевых вод часть урана сорбируется в русловых отложениях и верхних слоях почвы, а также накапливается в водах и донных отложениях искусственного водохранилища на реке Семизбай. Низкие фоновые содержания урана в русловых отложениях в нижнем течении реки Семизбай и в донных отложениях озера Жамантуз, а

также в речных, озерных и подземных водах (табл. 1, 2) свидетельствуют о наличии геохимического барьера, который географически расположен, вероятнее всего, вблизи границы сплошного распространения чехла Западно-Сибирской плиты и в непосредственной близости от месторождения Семизбай (рис. 1, Б). Верхний рудный горизонт месторождения Семизбай отделен от поверхности несколькими водоносными горизонтами – современным-верхнечетвертичным, люлинворским и первым верхнесемизбайским комплексом верхней юры – нижнего мела [24]. Поэтому, вероятнее всего, отложения, на которых происходит осаждение урана, стратиграфически относятся к P_g-N-Q платформенному чехлу Западно-Сибирской плиты и представляют собой современные фации заиливающегося русла реки Семизбай. Эта гипотеза требует дополнительных исследований, в первую очередь, в рудном поле эпигенетически-инфильтрационного месторождения Семизбай, в настоящее время закрытого его собственниками для экспедиционных работ.

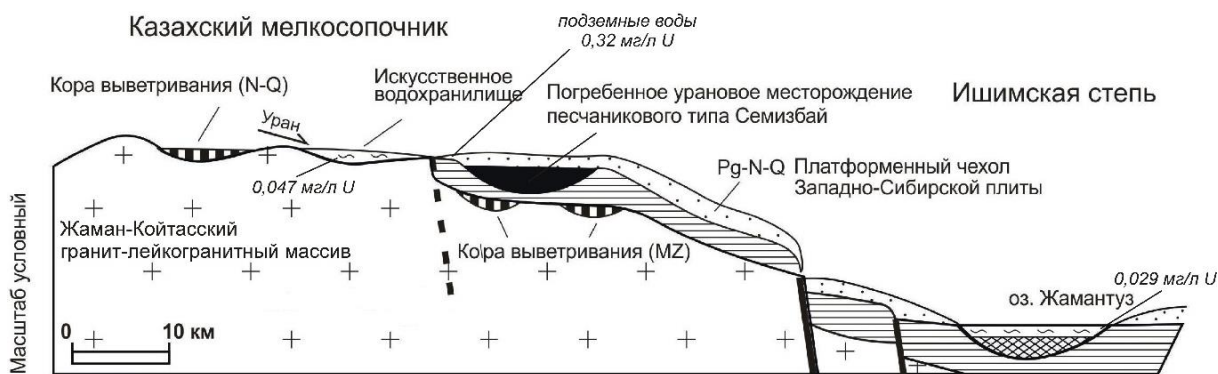


Рис. 4. Геохимическая модель выщелачивания урана из аркозовой коры выветривания (N-Q) по гранит-лейкогранитам Жаман-Койтасского массива, его миграции и накопления в русле реки Семизбай

Fig. 4. Geochemical model of uranium leaching from the arcogenic weathering crust (N-Q) after granite-leucogranites of the Zhaman-Koytass massif, and its migration and deposition in the Semizbay riverbed

Воды, выходящие на поверхность вблизи водохранилища, характеризуются $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na}$ составом и близкими к нейтральным значениями $\text{pH}=7,87$ и $\text{Eh}=-15$ мВ. В этих условиях уран находится в степени окисления VI. Необходимо отметить, что эти условия близки к границе, разделяющей формы урана IV и VI [25], которые значительно отличаются друг от друга миграционными свойствами [26]. Учитывая это, можно предположить, что миграция урана в подземных водах осуществляется преимущественно в виде карбонатных и гидрокарбонатных комплексов уранил-катиона [26–28]. В верхних слоях почвы и русловых отложениях в верхнем течении реки Семизбай уран, судя по их минеральному составу, преимущественно связан с гётитом, а также с глинистыми минералами и органическим веществом [26, 27].

Заключение

Русловые отложения, а также верхние слои почвы в верхнем течении реки Семизбай содержат повышенные концентрации урана ($\text{U}=8,6\text{--}24$ г/т, $\text{Th/U}=0,54\text{--}0,71$). Кроме того, содержание урана в искусственном водохранилище на реке Семизбай составляет 0,047 мг/л, а в ключевых прирусловых водах достигает 0,32 мг/л. Эти значения во много раз превышают фоновые содержа-

ния как в речных, озерных и подземных водах, так и в донных озерных отложениях Ишимской степи. На основании полученных данных предложена геохимическая модель выщелачивания урана из лейкогранитов Жаман-Койтасского массива. Его миграция происходит вместе с подземными и поверхностными водами. Осаждение и накопление урана, вероятнее всего, происходит в современных фациях заливающегося русла реки Семизбай.

Установленные авторами закономерности строения рудовмещающих осадочных толщ, литолого-фациальной и эпигенетической окислительно-восстановительной зональности, пределов накопления урана являются основой для продолжения научных исследований, а также систематических поисков и разведки новых урановорудных зон на рудном поле месторождения Семизбай.

Авторы благодарят О.П. Герасимову, Л.В. Куйбиду, О.Ю. Дубровину и Т.В. Мирясову за помощь в проведении экспедиционных работ, техническую поддержку при обработке аналитических данных и подготовке статьи.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН. Аналитические работы выполнены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Винокуров С. Ф. Типизация гидрогенных месторождений урана // Геология рудных месторождений. – 2022. – Т. 64. – № 1. – С. 113–134.
2. Uranium 2020: resources, production and demand. A joint report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. – NEA, OECD, 2020. – 480 p.
3. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные) / Н. Н. Петров, В. Г. Языков, Х. Б. Аубакиров, В. Н. Плеханов, А. Ф. Вершков, В. Ф. Лухтин. – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
4. Афанасьев Г. В., Миронов Ю. Б., Пинский Э. М. Новые аспекты формирования урановых месторождений песчаного типа // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 59. – С. 89–96.
5. Descriptive uranium deposit and mineral system models. – IAEA, 2020. – 313 p.
6. Кондратьева И. А., Боброва Л. Л. Геологическое строение и особенности рудогенеза месторождения Семизбай. Минеральное сырье. Серия методическая № 11. – М.: ВИМС, 2011. – 44 с.
7. Геологическая карта СССР масштаба 1:1000000. Лист N-43 (Омск). Объяснительная записка. – М.: Госгеолтехиздат, 1962. – 265 с.
8. Закономерности распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер Сибири / В. Д. Страховенко, Б. Л. Щербов, И. Н. Маликова, Ю. С. Восель // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – № 11. – С. 1501–1514.
9. Иванов А. Ю. Уран и торий в донных отложениях непроточных водоемов юга Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 159–165.
10. Уран и торий в донных отложениях соленых озер Ишимской степи (Северный Казахстан) / А. В. Карпов, А. Г. Владимиров, Л. И. Разворотнева, С. К. Кривоногов, И. В. Николаева, Е. Н. Мороз // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 9. – С. 6–17.
11. Главные факторы концентрирования урана в минерализованных озерах Ишимской степи (Западная Сибирь) / А. Г. Владимиров, С. К. Кривоногов, А. В. Карпов, И. Николаева В., Л. И. Разворотнева, М. Н. Колпакова, Е. Н. Мороз // Доклады Академии Наук. – 2018. – Т. 479. – № 6. – С. 659–665.

12. Saline lakes of Northern Kazakhstan: geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments / M.N. Kolpakova, O.L. Gaskova, O.S. Naymushina, A.V. Karпов, A.G. Vladimirov, S.K. Krivonogov // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 107. – P. 8–18.
13. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Ustinov M.T. Uranium and thorium contents in soils and bottom sediments of lake Bolshoye Yarovoye, western Siberia // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2020. – V. 211. – 106048.
14. Определение основных и примесных элементов в силикатных породах методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой после сплавления с LiBO_2 / И.В. Николаева, С.В. Палесский, О.С. Чирко, С.М. Черножжик // *Аналитика и контроль*. – 2012. – Т. 16. – № 2. – С. 134–142.
15. Ножжик А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов канского и шарыжалгайского комплексов. – Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. – 291 с.
16. Rene M. Alteration of granitoids and crystalline rocks and uranium mineralization in the Bor pluton area, Bohemian Massif, Czech Republic // *Оre Geology Reviews*. – 2017. – V. 81. – P. 188–200.
17. Whole-rock and biotite geochemistry of granites from the Miao'ershan batholith, South China: implications for the sources of the granite-hosted uranium ores / L. Zhang, Z. Chen, F. Wang, T. Zhou // *Оre Geology Reviews*. – 2021. – V. 129. – 103930.
18. Palmer M.R., Edmond J.M. Uranium in river water // *Chochimica et Cosmochimica Acta*. – 1993. – V. 57. – P. 4947–4955.
19. Uranium in rivers and estuaries of globally diverse, smaller watersheds / H. Windom, R. Smith, F. Niencheski, C. Alexander // *Marine Chemistry*. – 2000. – V. 68. – P. 307–321.
20. Molybdenium, vanadium and uranium weathering in small mountainous rivers and rivers draining high-standing islands / C.B. Gardner, A.E. Carey, W.B. Lyons, S.T. Goldsmith, B.C. McAdams, A.M. Tierweiler // *Chochimica et Cosmochimica Acta*. – 2017. – V. 219. – P. 22–43.
21. Геохимическая модель накопления урана в озере Шаазгай-Нуур (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. Куйбыда // *Доклады Академии Наук*. – 2012. – Т. 447. – № 6. – С. 658–663.
22. Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea / W. Shin, J. Oh, S. Choung, B.-W. Cho, K.-S. Lee, U. Yun, N.-C. Woo, H.K. Kim // *Chemosphere*. 2016. – V. 163. – P. 108–115.
23. Papageorgiou F., McDermott F., Van Acken D. Uranium in groundwaters: insights from the Leinster granite, SE Ireland // *Applied Geochemistry*. – 2022. – V. 139. – 105236.
24. Перспективы подземного скважинного выщелачивания урана на месторождении Семизбай / Э.А. Пирматов, С.А. Дюсамбаев, Б.О. Дуйсебаев, Е.Е. Жатканбаев, Л.С. Вятченникова, Г.А. Садырбаева // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2006. – № 11. – С. 246–254.
25. Takeno N. Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases. – Tokyo: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 2005. – 285 p.
26. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное – М.: Центр ЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
27. Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Уран. – Новосибирск: ПНТБ СО РАН, 2014. – 127 с.
28. Страховенко В.Д., Гаськова О.Л. Термодинамическая модель образования карбонатов и минеральных фаз урана в озерах Намши-нур и Цаган-тырм (Прибайкалье) // *Геология и геофизика*. – 2018. – Т. 59 – № 4 – С. 467–480.

Поступила: 17.07.2022 г.

Дата рецензирования: 26.09.2022 г.

Информация об авторах

Карпов А.В., младший научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Гаськова О.Л., ведущий научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Владимиров А.Г., главный научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Анникова И.Ю., старший научный сотрудник Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Мороз Е.Н., ведущий инженер Института Геологии и Минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 550.4 (550.424, 550.461)+550.791

GEOCHEMICAL MODEL OF URANIUM ACCUMULATION IN THE SEMIZBAY RIVERBED (NORTHERN KAZAKHSTAN URANIUM ORE PROVINCE)

Alexander V. Karpov¹,
akarpov@igm.nsc.ru

Olga L. Gaskova¹,
gaskova@igm.nsc.ru

Alexander G. Vladimirov¹

Irina Yu. Annikova¹,
iyannikova@igm.nsc.ru

Ekaterina N. Moroz¹,
ekaterina.n.moroz@gmail.com

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Ac. Koptuyg avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need of exploration of cheap uranium sources near potentially uranium ore bearing areas of Northern Kazakhstan based on studying modern processes of migration and accumulation of uranium.

The main aim is to propose a geochemical model of leaching, migration and accumulation of uranium in the Semizbay riverbed based on determining water and bottom sediment composition of river and lake reservoirs, and composition of the Zhaman-Koytass massif and its weathering crust as a primal source of uranium.

Objects: modern weathering crust of leucogranites of the eastern part of the Zhaman-Koytass massif; bed sediments of the Semizbay river and its tributary Shat river; riverbed spring, river and lake waters of the Semizbay, Seley rivers and Zhamantuz lake; bottom sediments of the Zhamantuz lake.

Methods: x-ray analysis, inductively coupled plasma mass spectrometry, x-ray crystallography, classic methods of determination of cation and anion composition.

Results. High concentrations of uranium in spring riverbed waters (0,32 mg/l) and artificial reservoir (0,047 mg/l) as well as elevated concentrations of uranium in riverbed soil (8,6–13 ppm) and bottom sediments of artificial reservoir (23–24 ppm) in the upper course of the Semizbay river were found. Based on the collected data the authors have proposed the geochemical model of uranium leaching from leucogranites of the Zhaman-Koytass massif, its migration and accumulation in the Semizbay riverbed, the modern facies of which act as the geochemical barrier on the way of uranium migration to ecosystem of the Ishim steppe. Uranium concentrations in riverbed sediments in lower course of the Semizbay river (1,9–2,7 ppm), as well as in water (0,0029 mg/l) and bottom sediments (4,6 ppm) of the Zhamantuz lake, which is the final discharge waterbody of the Semizbay river, represent background uranium concentrations in Western Siberia.

Key words:

Zhaman-Koytass massif, Semizbay river, uranium migration, geochemical model, Northern Kazakhstan, Ishim steppe.

Authors thank Oleg P. Gerasimov, Leonid V. Kuibida, Olga Yu. Dubrovina and Tatiana V. Miryasova for their help in conducting expedition work as well as technical help during reduction of the analytical data and writing the paper.

The work was carried out according to the state assignment of IGM SB RAS. Analytical procedures were completed in the Analytical Center for multi-elemental and isotope research SB RAS.

REFERENCES

- Vinokurov S.F. Tipizatsiya gidrogennykh mestorizhdeniy urana [Typification of uranium deposits of fluid-origin]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*. 2022, vol. 64, no. 1, pp. 113–134.
- Uranium 2020: resources, production and demand. A joint report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. NEA, OECD Publ., 2020, 480 p.
- Petrov N.N., Yazikov V.G., Aubakirov Kh.B., Plekhanov V.N., Vershkov A.F., Lukhtin V.F. *Uranovye mestorozhdeniya Kazakhstana (ekzogennye)* [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)]. Almaty, Gylm Publ., 1995. 264 p.
- Afanasyev G.V., Mironov Yu.B., Pinskiy E.M. New aspects of forming of sandstone-type uranium deposits. *Regional Geology and Metallogeny*, 2014, no. 59, pp. 89–96. In Rus.
- Descriptive uranium deposit and mineral system models*. IAEA Publ., 2020. 313 p.
- Kondrateva I.A., Bobrova L.L. *Geologicheskoe stroenie i osobennosti rudogenezha mestorozhdeniya Semizbay* [Geological structure and ore genesis peculiarities of the Semizbay deposit]. Moscow, VIMS Publ., 2011. 44 p.
- Geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:1000000. List N-43 (Omsk). Obyasnitelnaya zapiska* [Geological map of the USSR 1:1000000 scale. List N-43 (Omsk). Explanatory note]. Moscow, Gosgeoltekhizdat Publ., 1962. 265 p.
- Strakhovenko V.D., Shcherbov B.L., Malikova I.N., Vosel Yu.S. 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.
- Ivanov A.Yu. Uranium and thorium in bottom sediments of stagnant water reservoirs of south of Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 159–165. In Rus.
- Karpov A.V., Vladimirov A.G., Razvorotneva L.I., Krivonogov S.K., Nikolaeva I.V., Moroz E.N. Uranium and thorium in sediments of the Ishim plain lakes (Northern Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 6–17. In Rus.

11. Vladimirov A.G., Krivonogov S.K., Karpov A.V., Nikolaeva I.V., Razvorotneva L.I., Kolpakova M.N., Moroz E.N. The main factors of uranium accumulation in the Ishim plain saline lakes (Western Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2018, vol. 479, no. 2, pp. 511–517.
12. Kolpakova M.N., Gaskova O.L., Naymushina O.S., Karpov A.V., Vladimirov A.G., Krivonogov S.K. Saline lakes of Northern Kazakhstan: geochemical correlations of elements and controls on their accumulation in water and bottom sediments. *Applied Geochemistry*, 2019, no. 107, pp. 8–18.
13. Malikova I.N., Strakhovenko V.D., Ustinov M.T. Uranium and thorium contents in soils and bottom sediments of lake Bolshoye Yarovoye, western Siberia. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, no. 211, 106048.
14. Nikolaeva I.V., Paleskiy S.V., Chirko O.S., Chernonozhkin S.M. Opredelenie osnovnykh i primesnykh elementov v silikatnykh porodakh metodom mass-spektrometrii s induktivno-svyazannoy plazmoy posle splavleniya s LiBO₂ [Determination of major and trace elements in silicate rocks using inductively coupled plasma mass-spectrometry technique after fusion with LiBO₂]. *Analitika i kontrol*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 134–142.
15. Nozhkin A.D., Turkina O.M. *Geokhimiya granulitov kanskogo i sharyzhalgayskogo kompleksov* [Geochemistry of granulites of the kansk and sharyzhalgay complexes]. Novosibirsk, OIGGM SB RAS Publ., 1993. 291 p.
16. Rene M. Alteration of granitoids and crystalline rocks and uranium mineralization in the Bor pluton area, Bohemian Massif, Czech Republic. *Ore Geology Reviews*, 2017, no. 81, pp. 188–200.
17. Zhang L., Chen Z., Wang F., Zhou T. Whole-rock and biotite geochemistry of granites from the Miao'ershan batholith, South China: Implications for the sources of the granite-hosted uranium ores. *Ore Geology Reviews*, 2021, no. 129, 103930.
18. Palmer M.R., Edmond J.M. Uranium in river water. *Cheochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, no. 57, pp. 4947–4955.
19. Windom H., Smith R., Niencheski F., Alexander C. Uranium in rivers and estuaries of globally diverse, smaller watersheds. *Marine Chemistry*, 2000, no. 68, pp. 307–321.
20. Gardner C.B., Carey A.E., Lyons W.B., Goldsmith S.T., McAdams B.C., Tierweiler A.M. Molybdenum, vanadium and uranium weathering in small mountainous rivers and rivers draining high-standing islands. *Cheochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, no. 219, pp. 22–43.
21. 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., Kuibida L.V. Geokhimicheskaya model nakopleniya urana v ozere Shaazgay-Nuur (Severo-Zapadnaya Mongolia) [Geochemical model of uranium accumulation of uranium in the Shaazgay-Nuur lake (Northwestern Mongolia)]. *Doklady Akademii Nauk*, 2012, vol. 447, no. 6, pp. 658–663.
22. Shin W., Oh J., Choung S., Cho B.-W., Lee K.-S., Yun U., Woo N.-C., Kim H.K. Distribution and potential health risk of groundwater uranium in Korea. *Chemosphere*, 2016, no. 163, pp. 108–115.
23. Papageorgiou F., McDermott F., Van Acken D. Uranium in groundwaters: Insights from the Leinster granite, SE Ireland. *Applied Geochemistry*, 2022, no. 139, 105236.
24. Pirmatov E.A., Dyusambaev S.A., Dusejbaev B.O., Zhakanbaev E.E., Vyatchennikov L.S., Sadyrbaeva G.A. Perspektivy podzemnogo skvazhinnogo vychshelachivaniya urana na mestorozhdenii Semizbay [Perspectives of underground well leaching of uranium on the Semizbay deposit]. *Gorny informatsionno-analiticheskiy bulletin*, 2006, no. 11, pp. 246–254.
25. Takeno N. *Atlas of Eh-pH diagrams. Intercomparison of thermodynamic databases*. Tokyo, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Publ., 2005. 285 p.
26. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod. Teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of underground waters. Theoretical, applied and ecological aspects]. 2nd ed. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p.
27. Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. *Sorbtsionnye protsessy pri zagryaznenii podzemnykh vod tyazhelymi metallami i radioaktivnymi elementami. Uran* [Sorption processes during contamination of underground waters by heavy metals and radioactive elements. Uranium]. Novosibirsk, GPNTB SB RAS Publ., 2014. 127 p.
28. Strakhovenko V.D., Gaskova O.L. Thermodynamic model of formation of carbonates and uranium mineral phases in lakes Namshi-nur and Tsagan-tyrm (Cisbaikalia). *Geology and geophysics*, 2018, vol. 59, no. 4, pp. 467–480. In Rus.

Received: 17 July 2022.

Reviewed: 26 September 2022.

Information about the authors

Alexander V. Karpov, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Olga L. Gaskova, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Alexander G. Vladimirov, Dr. Sc., leading researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

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

Ekaterina N. Moroz, leading engineer, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.