



ГЕОХИМИЯ УРАНА В ПРОЦЕССАХ ВЫВЕТРИВАНИЯ И ГИДРОГЕННОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ

Н. А. Росляков¹, С. М. Жмодик^{1,2}, В. Д. Страховенко^{1,2}, Ю. С. Восель¹

Обсуждаются геохимические особенности поведения урана в процессе формирования кор выветривания на магматических породах, в различных палеоклиматических условиях в возрастном диапазоне от верхнего мела до голоцена. На основе большого фактического материала с использованием методов нейтронно-осколочной радиографии и расчета баланса урана и тория в системе исходная порода – выветрелая порода установлены факторы, контролирующие тенденции перераспределения естественных радиоактивных элементов и эволюцию форм их нахождения в процессе гидрогенного рудообразования.

Ключевые слова: геохимия, естественные радионуклиды, экзогенные процессы.

URANIUM GEOCHEMISTRY IN THE PROCESSES OF WEATHERING AND HYDROGENIC ORE FORMATION

N. A. Roslyakov, S. M. Zhmodik, V. D. Strakhovenko, Yu. S. Vosel

This article discusses the geochemical features of uranium in the formation of weathering crusts on igneous rocks, in various paleoclimatic conditions, and at the Upper Cretaceous to Holocene ages. Factors controlling trends of natural radioactive elements redistribution and evolution of their modes of occurrence in the hydrogenic ore formation were defined on the basis of abundant samples using neutron radiography methods and balance calculation of uranium and thorium in the original rock – weathered rock system.

Keywords: geochemistry, natural radionuclide, exogenous process.

Открытие крупных гидрогенных месторождений урана в разных регионах показало, что в их формировании важную роль играют экзогенные процессы выветривания ураноносных пород. Механизм миграции естественных радионуклидов и способов их концентрации пока остается слабо изученным. На примерах описываемых районов покажем роль кор выветривания в гидрогенном рудообразовании урана и его спутника тория.

Объекты исследования

В районах исследований (Иволгинская впадина, Витимское плоскогорье, Заангарский массив Енисейского кряжа, южное обрамление Западно-Сибирской плиты, включая донные отложения современных озер) широко распространены коры выветривания гидрослюдисто-каолинистового профиля [5, 8 и др.].

Методы изучения

При исследованиях использованы: 1) традиционные геолого-геохимические приемы сравнительного анализа каменного материала системы: коренные не измененные процессами выветривания породы – их элювиальные образования; 2) современные аналитические методы определения урана и тория.

Каменный материал получен при опробовании керн скважин, из естественных обнажений, карьеров и горных выработок. Из пород субстрата отбирались пробы весом до 10 кг, которые истира-

лись до размера 250 мкм с последующим квартованием до навески 400–600 г для гамма-спектрометрического анализа, а из нее выделялись миллиграммовые пробы на люминесцентный, колориметрический анализы и на рентгено-осколочную радиографию. Определение доли подвижного урана и тория в породах и фракциях проводилось методом селективного выщелачивания из одной навески. Реагентом для выщелачивания служили растворы 1N HCl и 5 %-ный $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$.

Результаты исследований

Уран и торий в исходных породах распределены неравномерно. Как следует из таблицы, на юге Западной Сибири максимальное содержание урана свойственно редкометалльным гранитам и черносланцевым толщам (10,4 и 34 г/т соответственно). На Витимском плоскогорье ураном обогащены граниты относительно сиенитов.

В гранитоидах до 65–80 % U и Th связано с цирконом, сфеном, апатитом, магнетитом и биотитом, а на юге Западной Сибири – с редкометалльными гранитами.

На Витимском плоскогорье коры выветривания чаще представлены сокращенным каолинит-гидрослюдистым профилем с сохранившимися от денудации зонами дезинтеграции и начального выветривания. В обрамлении Западно-Сибирской равнины сохранились полные профили с зонами сапролитов, каменного и глинистого и даже бесструктурного элювия. Наблюдается линейная зависимость между содержанием U и Th в корях выветривания и в субстрате. Как следует из рис. 1,

¹ ИГМ СО РАН (Новосибирск); ² НГУ (Новосибирск)

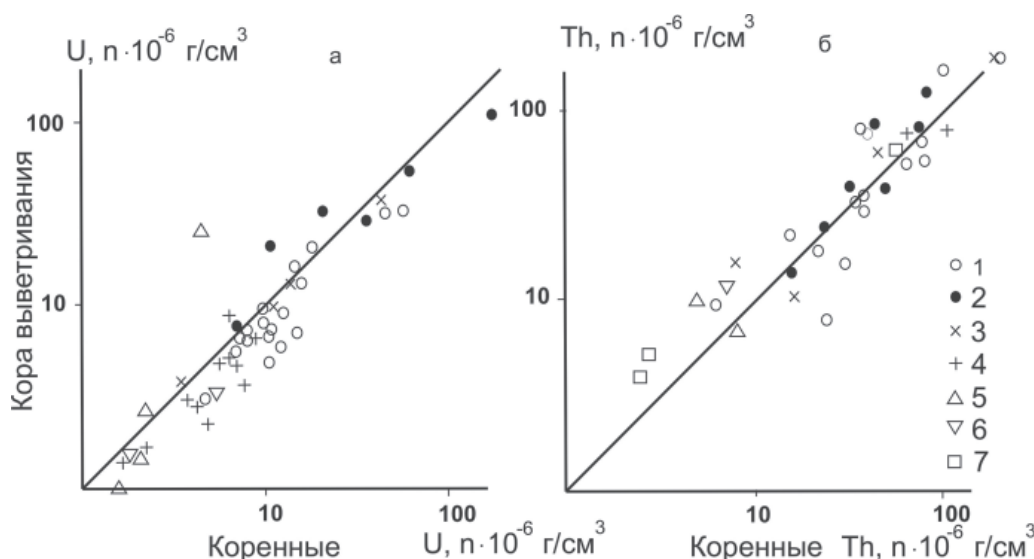


Рис. 1. График зависимости между содержанием урана (а) и тория (б) в коренных породах и их корах выветривания на Витимском плоскогорье

Продукты выветривания пород: 1 – кислых, 2 – щелочных, 3 – карбонатных, 4 – сланцев, 5 – диабазов, долеритов, 6 – туфов, 7 – амфиболитов, пироксенитов

Эндеогенные источники урана и тория на Витимском плоскогорье и юге Западно-Сибирской равнины (г/т)

Главные комплексы пород	U	Th	U/Th	Район исследования
Сиениты	2,65	6,69	2,37	Иволгинская котловина
Граниты	5,68	44,55	7,83	То же
Андезитобазальты	1,3	2,2	1,68	Юг Западной Сибири
Редкометалльные граниты	10,4	22,1	2,12	То же
Песчано-сланцевые	1,4	5,2	3,71	«
Черносланцевые	34	7	0,21	«
Карбонатные	1,4	0,3	0,21	«

большая часть точек для урана расположена ниже линии прямой пропорциональной зависимости, что указывает на уменьшение концентраций элемента в процессе выветривания исходных пород. Соответственно, мала вероятность образования высоких концентраций U и Th в корах выветривания по породам с низкими содержаниями этих элементов. Одним из главных факторов, определяющих уровень концентраций U и Th в ко-

рах выветривания, является их содержание в материнских породах.

Повышенные содержания урана в корах выветривания чаще связаны с остаточными ореолами рассеяния месторождений либо со вторичными процессами (инфильтрации и инсоляции) [1]. В разрезе профилей выветривания перераспределение U по вертикали несущественно (рис. 2). Более вариабельно оно у Th (рис. 3). Более интенсивное перераспределение урана свойственно профилям на исходных аномальных по урану породах, что видно по результатам опробования Барлакского гранитоидного массива, расположенного в Томь-Колыванской складчатой области, и карбонатитов Витимского плоскогорья (см. рис. 2).

Перераспределение естественных радионуклидов в профиле выветривания сопровождается изменением их форм нахождения. Так, если минералы носители U в исходных породах – биотит, магнетит, сфен и апатит, то в продуктах выветривания радионуклиды в значительной мере наследуются лейкоксеном, пирохлором, сорбируются гидроксидами железа и глинистыми минералами.

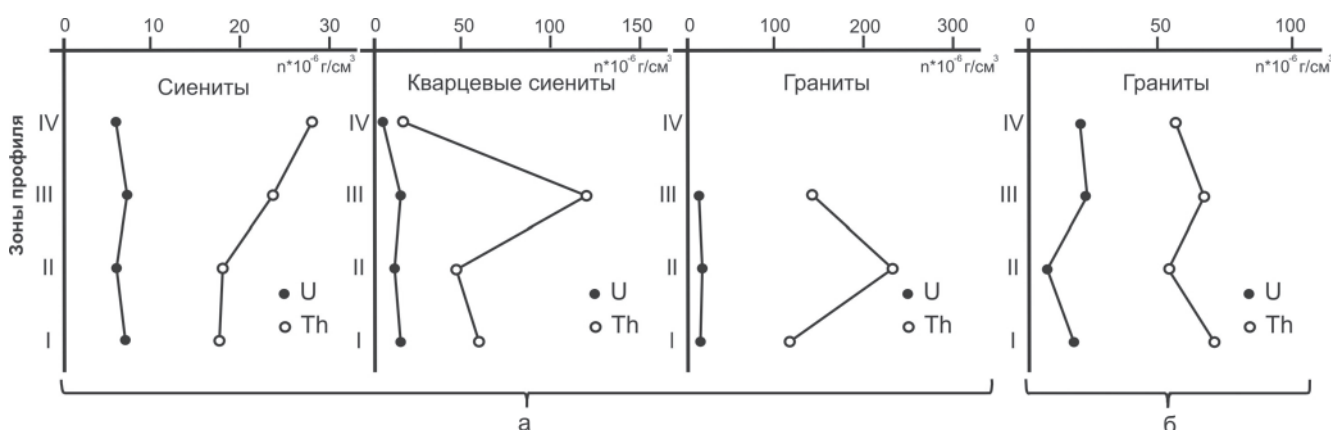


Рис. 2. Распределение урана и тория в профиле выветривания Витимского плоскогорья: а – Иволгинская котловина, б – зазинский комплекс Аталангинской палеодолины

Зоны профиля выветривания: IV – глинистого элювия, III – дезинтеграции, II – слабого выветривания, I – исходных пород

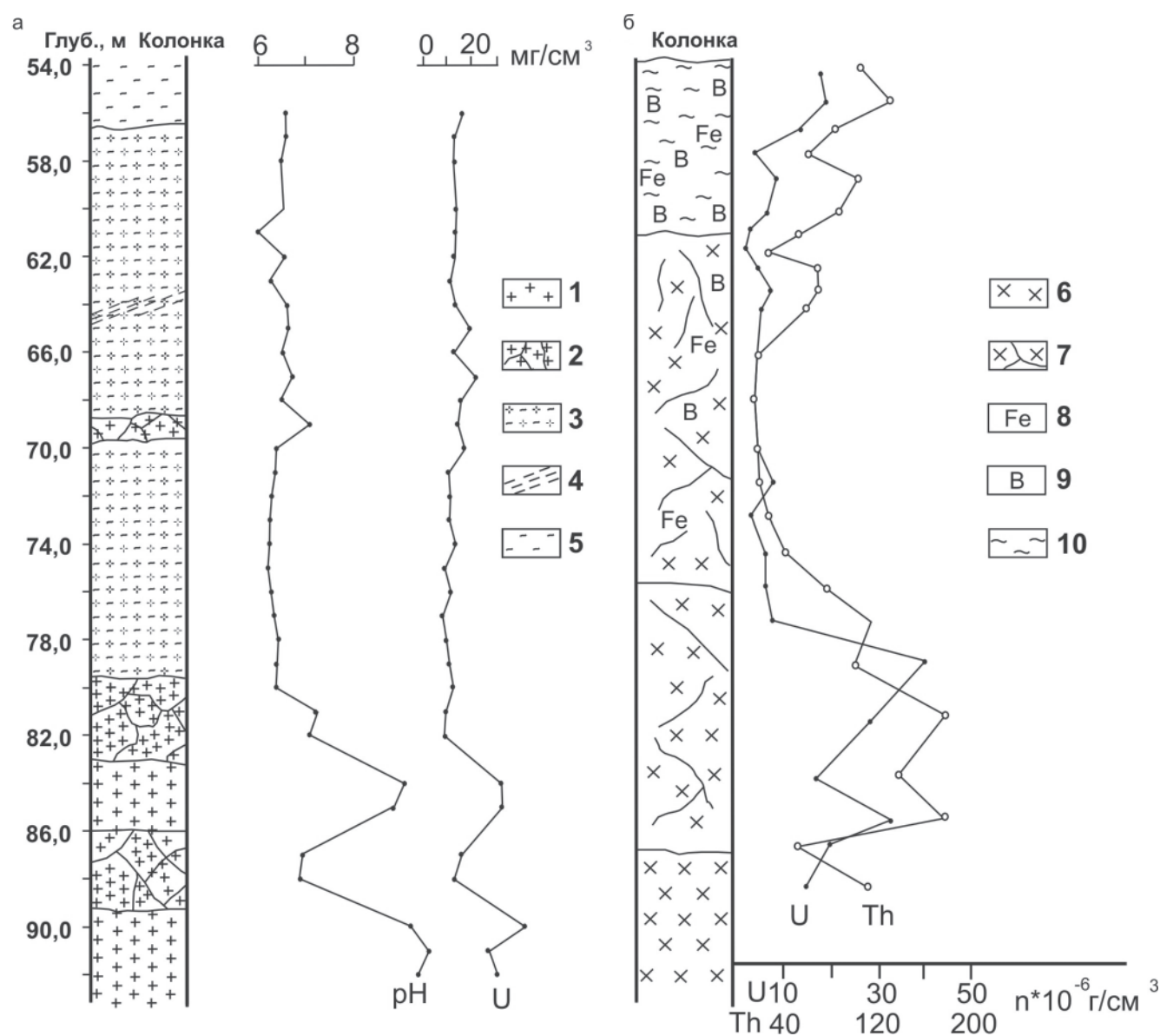


Рис. 3. Распределение урана и тория в профиле выветривания гранитов Барлакского массива, Западная Сибирь (а) [2] и флогопитовых карбонатитов (б) [5]

1 – граниты; 2 – каменный структурный элювий; 3 – глины; 4 – зона дробления; 5 – переотложенные породы; 6 – невыветрелый флогопитовый карбонатит; 7 – каменный структурный элювий; 8 – гидроокислы железа; 9 – вермикулит; 10 – глины

Наиболее характерны для коры выветривания сорбционная форма и урансодержащие микровключения (рис. 4, 5). Концентрациями и носителями Th служат также дисперсные глинистые минералы.

Обсуждение результатов

Уран известен в природе в четырех- и шестивалентных формах [4]. В гипергенных условиях U^{+4} малоподвижен и в остаточном обломочном субстрате склонен к изоморфизму с торием, цирконием и редкими землями благодаря близости их ионных радиусов. Важная геохимическая особенность – способность U^{+4} легко окисляться из четырехвалентного состояния в шестивалентное. Шестивалентный уран, обычно представленный ионом уранила UO_2^{2+} , с кислотами образует раз-

нообразные соли. Легкая растворимость сульфатных и карбонатных соединений урана U^{6+} играет исключительную роль в миграции и концентрации урана в гипергенных процессах. Наиболее распространенная форма миграции урана – уранил-карбонатные и уранил-гуматные комплексы, меньше распространены гидроксил-уранильные, еще меньше – уранил-сульфатные комплексы [1].

Поведение урана в процессах выветривания горных пород определяется его высокой миграционной способностью в окислительной обстановке. Глубокое химическое изменение горных пород, ведущее к образованию глинистой коры выветривания, не является необходимым фактором выщелачивания урана. Факты показывают, что вынос урана из пород значительно опережает их глубокое химическое изменение

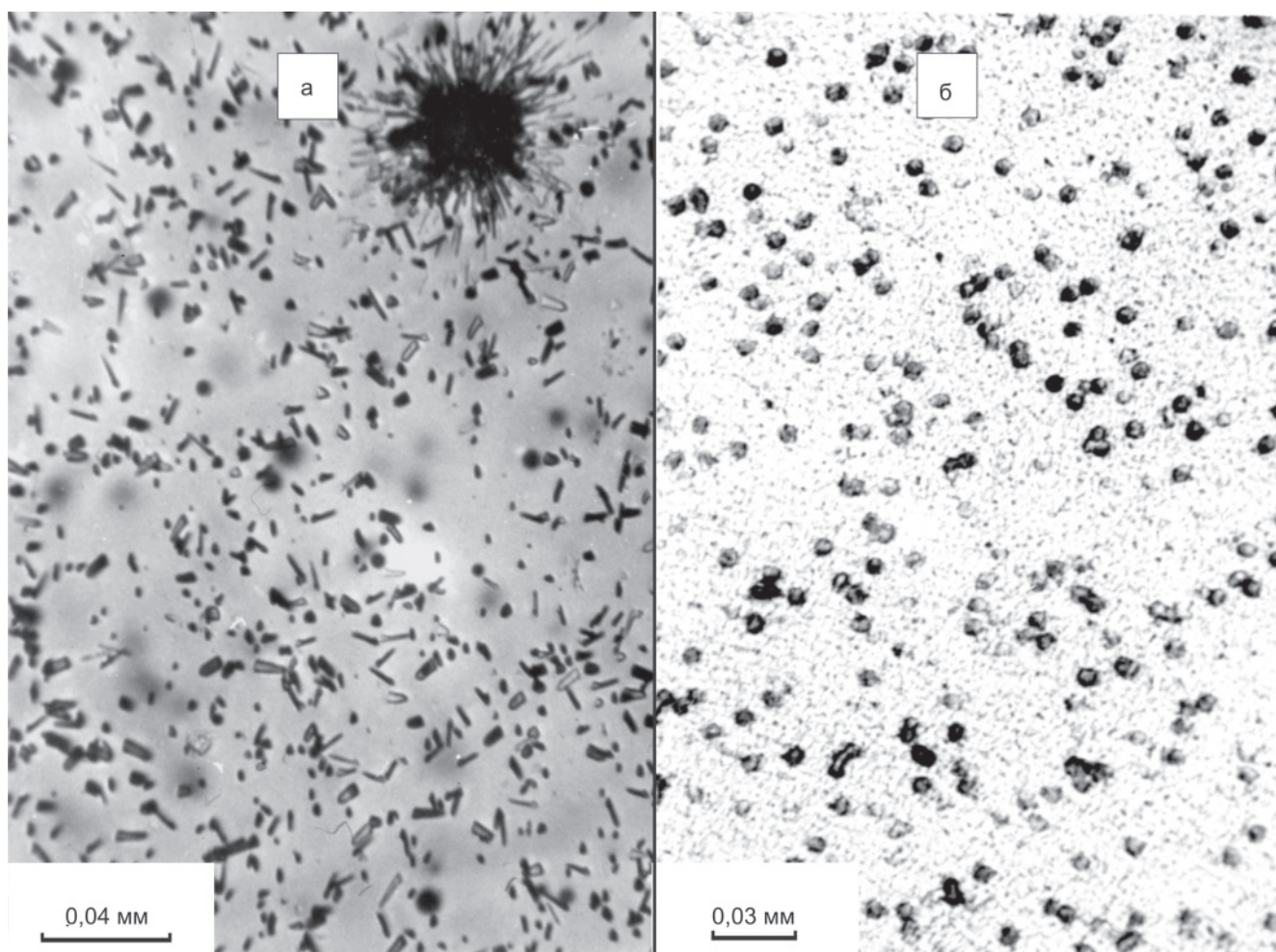


Рис. 4. Нейтронно-осколочные авторадииограммы, фиксирующие распределение урана в глинистом материале гранулометрических фракций (а – 1–10 мкм, б – <1 мкм) из кор выветривания карбонатитов Белозиминского месторождения

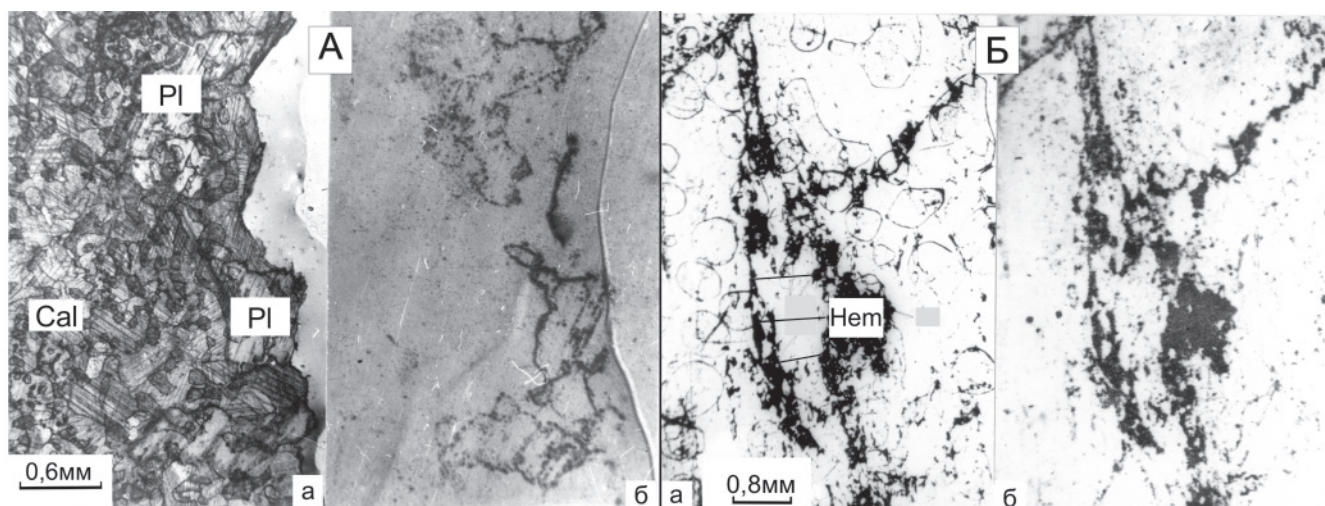


Рис. 5. Пространственное распределение урана (нейтронно-осколочные авторадииограммы) в кальцитовых карбонатах Белозиминского массива: неизмененных экзогенными процессами (А) и на начальных стадиях выветривания (Б): а – шлиф, б – нейтронно-осколочные авторадииограмма

(см. рис. 2, б). Элементы начинают мигрировать с момента перехода породы в зону аэрации [12]. Выветривание пород в окислительной обстановке приводит прежде всего к изменению форм нахождения урана. Уран, сконцентрированный в породообразующих и акцессорных минералах,

переходит в раствор с последующей сорбцией его гипергенными тонкодисперсным окислами и силикатами. Происходят мобилизация и концентрация в процессе выветривания легкоподвижного урана, сорбционно связанного с минералами глин и гидроокислов [5, 11].



Изучение донных отложений различных озер Сибири на сканирующем электронном микроскопе показало, что осадки представлены обломочной фракцией в основном алевропелитовой размерности, биохеомогенными карбонатами и органическим рентгеноаморфным материалом, сложенным отмершими остатками планктона и макрофитов. Концентрации урана обломочной фракции в донных осадках отдельно взятого озера наследуют радиогеохимические особенности почв, а следовательно, и вмещающих пород областей сноса [7]. Выявлены вариации значений урана в донных осадках озер и в почвах их водосборных площадей в пределах одной ландшафтной зоны. В донных илах с учетом их минерального состава фиксируются следующие закономерности: с ростом карбонатной или органогенной составляющей относительно обломочной фракции абсолютные значения U падают. Но есть и исключения. В донных отложениях терригенно-карбонатного состава в озерах, расположенных в степном ландшафте с содовой или содово-сульфатной минерализацией и высокой щелочностью вод, содержание U значительно выше, чем в почвах и горных породах. Указанные параметры воды благоприятствуют высокой подвижности уранил-карбонатных соединений натрия $\text{Na}_4[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]$ и накоплению в них урана в ходе эволюции вод [3, 13]. Кроме того, увеличение органогенной составляющей в некоторых случаях влечет за собой повышение концентрации урана в осадке. Общеизвестно, что органогенные илы обогащаются U в восстановительной обстановке при нейтральном или слабощелочном pH [6, 10, 11 и др.].

Типы гипергенных месторождений урана

В России к настоящему времени выделены и изучены следующие генетические типы гипергенных месторождений урана:

- связанные с остаточными корами химического выветривания и их переотложенными продуктами (Малиновское, Кузнецкий Алатау; Пригородное, Лапинский Лог, Салаир);
- экзодиагенетические, грунтово-инфильтрационные стадии диагенеза: торфяники (Ангошская согра, Пензинское, Тюлькино, Мокрушинское, Западно-Сибирская плита; Камышановское), бурые угли (Бельское, Мосбасс), рудоносные зоны в орогенных впадинах (Усть-Уюк, Алтае-Саянская область);
- эпигенетические, грунтово-инфильтрационные постседиментационных стадий: базальные палеодолины (Долматовское, Зауралье), внутриформационные палеодолины (Черепановское, Пермское, Предуралье);
- эпигенетические, пластово-инфильтрационные: границы выклинивания локальных зон пластового окисления с очагами и без очагов восстановления (Чалгыс-Хыр, Минусинская впадина), границы выклинивания зон пластового окисления

регионального распространения (Михайловское, Кулундинская впадина);

- эпигенетические, трещинно-инфильтрационные: на цеолитовом барьере (Горное, Забайкалье);
- пластово-трещинные: гидротермально-инфильтрационные (Орловское, Имское, Россия);
- уранобитумные, контролируемые восстановительной зональностью (Репьевское, Приволжье; Адамовское, Донбасс).

Выводы

1. Обобщены результаты многолетних исследований по содержанию естественных радионуклидов в исходных и выветрелых породах, в донных отложениях малых озер Сибири, почвах и почвообразующих породах их водосборных площадей.

2. В корях выветривания ведущее значение приобретают две формы нахождения урана и тория: сорбционная на гидроокислах железа и глинистых минералах и минеральная в составе трудно разрушаемых минералов – концентраторов урана и тория (циркон, монацит и др.).

3. Основными концентраторами урана и тория в корях выветривания являются высокодисперсные минералы – монтмориллонит, каолинит, иллит, гидроокислы железа и марганца, в большинстве случаев концентрирующиеся в глинистой (<1 мкм) и тонкопелитовой (1–10 мкм) фракциях.

4. В миграционной стадии переноса подвижных форм урана растворами по разломам и породам с повышенной проницаемостью (в том числе и региональным корам выветривания) важную роль играют уранилкарбонатные комплексы – $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{-2}$ – пластовых кислородсодержащих вод зоны гипергенеза и катагенеза с последующим его выносом из пород.

5. Концентрационная стадии накопления урана на физико-химических, сорбционных, термобарических или других барьерах приводит к его мобилизации и отложению с водородным образованием в породах его аномальных и рудных полей.

Работа выполнена при поддержке ИП 89, 93, 94, гранта РФФИ № 12-05-01164, МинОиН РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арбузов, С. И.** геохимия радиоактивных элементов [Текст] / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. – Томск : ТПУ, 2010. – 300 с.
2. **Гавшин, В. М.** «Баженовиты» на норвежском континентальном шельфе [Текст] / В. М. Гавшин, В. А. Захаров // Геология и геофизика. – 1991. – № 1. – С. 62–71.
3. **Геохимия** и формирование состава солевых озер Западной Монголии [Текст] / С. Л. Шварцев, М. Н. Колпакова, В. П. Исупов [и др.] // Геохимия. – 2014. – № 5. – С. 432–450.



4. **Евсеева, Л. С.** Геохимия урана в зоне гипергенеза [Текст] / Л. С. Евсеева, А. И. Перельман. – М. : Атомиздат, 1962. – 240 с.

5. **Жмодик, С. М.** Геохимия радиоактивных элементов в процессе выветривания карбонатов, кислых и щелочных пород [Текст] / С. М. Жмодик. – Новосибирск : Наука, 1984. – 145 с.

6. **Закономерности** распределения микроэлементов в профиле выветривания Барлакского гранитного массива [Текст] / В. М. Гавшин, Б. Л. Щербов, Ф. В. Сухоруков [и др.] // Геохимия рудных элементов в процессах выветривания, осадконакопления и катагенеза. – Новосибирск, 1979. – С. 5–19.

7. **Закономерности** распределения радионуклидов и редкоземельных элементов в донных отложениях озер различных регионов Сибири [Текст] / В. Д. Страховенко, Б. Л. Щербов, И. Н. Маликова, Ю. С. Восель // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – С. 1501–1514.

8. **Калинин, Ю. А.** Золотоносные коры выветривания юга Сибири [Текст] / Ю. А. Калинин, Н. А. Росляков, С. Г. Прудников. – Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2006. – 339 с.

9. **Рихванов, Л. П.** Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозологии [Текст] / Л. П. Рихванов. – Томск : STT, 2009. – 430 с.

10. **Смыслов, А. А.** Уран и торий в земной коре [Текст] / А. А. Смыслов. – Л. : Недра, 1974. – 459 с.

11. **Титаева, Н. А.** Ядерная геохимия [Текст] / Н. А. Титаева. – М. : Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.

12. **Шварцев, С. Л.** Гидрогеохимия зоны гипергенеза [Текст] / С. Л. Шварцев. – М. : Недра, 1998. – 356 с.

13. **Drever, J. I.** Surface and groundwater, weathering, and soils [Text] / Treatise on geochemistry. – Elsevier, Pergamon. – 2005. – Vol. 5. – 644 p.

© Н. А. Росляков, С. М. Жмодик,
В. Д. Страховенко, Ю. С. Восель, 2014