

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОТНОШЕНИЯ Th/U ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ТИПИЗАЦИИ ГРАНИТОИДОВ И СТЕПЕНИ ИХ СООТВЕТСТВИЯ ИНТРУЗИВНЫМ ОБРАЗОВАНИЯМ

Л.П. Рихванов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
634050, Томск, просп. Ленина, 30, Россия*

Обсуждается использование радиоактивных элементов для решения геохимических вопросов, связанных с гранитоидным магматизмом. Выделяются металлогенические типы гранитов на основе информации об уровне накопления в них радиоактивных элементов (ториеносные, редкометалльные, ураноносные, золоторудные и др.). Особое внимание обращается на величину торий-уранового отношения, которое в первично-магматических породах имеет величину более 2.5. Таковыми являются литий-фтористые граниты Онгон-Хайрхана (Монголия). Гранитоиды, имеющие этот показатель меньше 2, а тем более 1, нельзя рассматривать как магматические. Они либо метасоматически преобразованы, либо вообще имеют метасоматический генезис. Использовать петрохимические и геохимические данные по этим типам пород для петрологических выводов следует с большой осторожностью. Радиогеохимические показатели могут и должны использоваться как дополнительные индикаторы происхождения пород, генезис которых дискусионен в силу широко проявленных явлений конвергенции и метасоматоза.

*Уран, торий, торий-урановое отношение, гранитоидный магматизм, радиогеохимическая типизация, метасоматоз.*

## USING RADIOACTIVE ELEMENTS AND THE Th/U RATIO IN STUDY OF THE GEOCHEMICAL TYPIFICATION OF GRANITOIDS AND THEIR INTRUSIVE CHARACTER

L.P. Rikhvanov

This paper considers the use of radioactive elements for the solution of geochemical problems related to granitoid magmatism. The metallogenic types of granites are recognized on the basis of the contents of radioactive (Th-bearing, rare-metal, U-bearing, gold ore, etc.) elements in them. Special attention is focused on the Th/U ratio, which is higher than 2.5 in primary igneous rocks, such as Li-F granites of the Ongon-Hayrhan deposit (Mongolia). Granitoids with Th/U < 2 (and, the more so, Th/U < 1) cannot be considered igneous. They are either metasomatized or of metasomatic genesis. Petrochemical and geochemical data on these types of rocks should be used for petrological implications with great care. Radiogeochemical indices can and must be used as additional indicators of the genesis of rocks, when it is controversial because of the widely manifested convergence and metasomatism processes.

*Uranium, thorium, Th/U ratio, granitoid magmatism, radiogeochemical typification, metasomatism*

### ВВЕДЕНИЕ

Естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) благодаря своей распространенности привлекали внимание как геологические индикаторы с момента их открытия.

На ранних этапах становления радиогеохимии использование урана, тория и радиоактивного изотопа калия-40 сдерживалось отсутствием надежных методов измерения. К началу 70-х годов XX столетия появилось значительное количество методов определения естественных радиоэлементов (люминесцентные, фотокolorиметрические, нейтронно-активационные, метод запаздывающих нейтронов, гамма-спектрометрические и другие), позволяющие с высокой степенью чувствительности и надежности определять эти компоненты во всех природных объектах как в лабораторных, так и в полевых, в том числе дистанционных (аэро- и другие) условиях.

Это позволило чрезвычайно быстро получить большой объем информации по геохимии ЕРЭ в различных геологических процессах и при различных видах магматизма, особенно гранитоидного.

Впервые в открытой форме об этих данных обстоятельный разговор состоялся в 1972 г. на I Всесоюзном радиогеохимическом совещании в Новосибирске. В нем приняли участие все крупнейшие в этой области специалисты: А.И. Тугаринов, Л.В. Комлев, В.И. Герасимовский, В.И. Баранов, А.А. Смыслов, Ф.П. Кренделев, Я.Н. Белевцев, Н.Н. Амшинский и другие.

Позднее вопросы индикаторной роли ЕРЭ в геологических процессах обсуждались на II Всесоюзном совещании в Душанбе (1975), на III Всесоюзном совещании в Томске (1992), а затем на Международных конференциях «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (Томск, 1996, 2004, 2009, 2013, 2016).

На всех этих конференциях рассматривались вопросы геохимии урана, тория и калия в процессе развития гранитоидного магматизма.

Аналогичные работы велись и ведутся в США, европейских и других странах.

Многочисленные исследования показали, что естественные радиоактивные элементы встречаются во всех объектах материального мира в тех или иных количествах, в том числе интрузивных [Hamilton 1989; Рихванов, 2004, 2017; и др.].

Геохимия естественных радиоактивных элементов, и прежде всего урана и тория, в природных объектах различных оболочек планеты изучена сравнительно полно [Смыслов, 1974; Основные черты..., 2013]. Особенно это касается литосферы. Работами советских и российских геологов В.И. Вернадского, А.П. Виноградова, Д.И. Щербакова, В.И. Баранова, В.И. Герасимовского, Л.В. Таусона, Л.В. Комлева, И.Е. Старика, А.И. Тугаринова, Я.И. Белевцева, Н.П. Ермолаева, А.А. Смылова, Е.Б. Высокоостровской, Е.В. Плющева, Г.Б. Наумова, В.П. Ковалева, В.А. Злобина и многих других, а также зарубежных специалистов: Дж. А. Адамс (Adams), С.В. Аллегре (Allegre), Е.С. Ларсен (Larsen), С.Л. Роджерс (Rodgers), Т.Дж. Ловеринг (Lovering), Росхолт (Rosholt), Хассман (Husmann), И.Д. Девис (Davis), Дж.В. Вайн (Vine), М. Пажель (M. Pagel) и др. установлены определенные закономерности их поведения и накопления в тех или иных геологических процессах, в том числе в процессе магматизма [Смыслов, 1974; Hamilton, 1989].

Так, например, в ряду нарастающей кремнекислотности—щелочности содержание урана и тория возрастает, достигая своего максимума в щелочных гранитах [Смыслов, 1974; Hamilton, 1989; и др.]. Эта закономерность может нарушаться только в щелочных, щелочно-ультраосновных и ультраосновных породах [Смыслов, 1974; Рихванов, 2002]. Так, нами зафиксированы в щелочно-ультраосновных породах (анкаратритах) Ербинского некка содержание естественных радиоактивных элементов на уровне щелочных гранитоидов (U — 8.5 г/т; Th — 25.7 г/т; K — 1.6 %), а в породах Алтая, известных под названием «лампрофиры», установлены аномальные концентрации этих элементов: (U — 6.5—7.6 г/т, Th — 55.3—59.0 г/т), а в некоторых случаях, по новейшим данным, эти концентрации достигают 16 и 136 г/т соответственно при величине торий-уранового отношения 8.5, что, несомненно, свидетельствует о чрезвычайно специфических режимах формирования этих пород [Васюкова, 2017; и др.].

Достаточно уверенно просматривается тенденция возрастания содержания ЕРЭ от ранних магматических комплексов или фаз к поздним, что отражает общую закономерность обогащения ураном и торием остаточных расплавов. При этом геохимическая история урана в процессе дифференциации магм, как это было показано [Таусон, 1961], не связана ни с одним из порообразующих элементов (Si, K, Na и др.). Была выявлена статистическая взаимосвязь между ЕРЭ и петрохимическими показателями магматических пород, что позволило предложить радиогеохимический ключ к определению этих пород в координатах  $a-Q$ , используемых в петрохимической классификации А.Н. Заварицкого [Ермолаев, Соборнов, 1973].

Были определены понятия «минералы-носители» и «минералы-концентраторы» [Таусон, 1961], выделены основные формы нахождения урана в породах и минералах [Смыслов, 1974].

Установлено, что химические свойства (валентность, размер ионных радиусов, растворимость и др.)  $U^{4+}$  и  $Th^{4+}$  близки к таковым для REE, Zr, Hf и некоторых других редких элементов, тогда как  $U^{6+}$  принципиально от них отличается.

Иными словами, геохимическая «судьба» U и Th идентична в магматических и высокотемпературных процессах, а в низкотемпературных флюидоводных системах в экзогенных условиях в силу перехода  $U^{4+}$  в  $U^{6+}$  она становится иной. Индикатором этого изменения является отношение тория к урану. К сожалению, на этот радиогеохимический параметр обращается недостаточное внимание, а он во многих случаях мог бы помочь определиться с генезисом магматических образований [Allegre et al., 1986; Рихванов, 2002].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основу данной статьи положены многолетние личные наблюдения автора за радиогеохимическими показателями пород, метасоматитов и руд в различных регионах России и за рубежом, а также многочисленные публикации в литературе, в которых Th и U уже стали классическими показателями того или иного типа пород, вошедших в различные справочники. Используются также данные, полученные производственными организациями («Сосновгеология», «Березовгеология», «Степьгеология» и др.) при проведении аэрогамма-спектрометрических исследований территорий России и Монголии, для

которых составлены карты содержаний урана, тория и калия. Эти карты дают некоторое представление о радиогеохимической специализации регионов. При этом пределы определения этих элементов современным аэрокомплексом составляют: по урану — 0.35 г/т, по Th — 0.5 г/т, а по К — 0.11 %, что находится на нижекларковых уровнях содержаний этих элементов в земной коре.

Отбор проб и их подготовка для получения радиогеохимических данных проводились в соответствии с имеющимися методическими рекомендациями по радиогеохимическим и геохимическим исследованиям, обобщавшим многочисленные исследования по этому вопросу российских геологов (Н.И. Сафронов, А.П. Соловов, А.А. Смыслов и др.), а также с учетом методических приемов геохимического опробования, реализуемых в других странах, в том числе исходя из рекомендаций и опыта реализации программы МГХК-1000, Международной программы МРГК № 259.

Следует отметить, что практически каждая проба сопровождалась изготовлением прозрачных, в ряде случаев прозрачно-полированных и полированных шлифов (аншлифов), что позволило получить однородные достоверные по чистоте геохимические выборки, исключая наложенные процессы, для последующей статистической обработки.

Уран и торий, выбранные в качестве основных элементов для типизации рудно-магматических систем, обладают рядом уникальных, прежде всего ядерно-физических и некоторых химических свойств ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -радиоактивность и др.), что позволило разработать и внедрить большое количество как лабораторных, так и полевых методов их анализа. Метрологические параметры некоторых из этих методов приведены в таблице.

Сравнение различных методов анализа радиоэлементов показало, что наиболее высокочувствительным и правильным методом анализа на уран на современном этапе развития является метод запаздывающих нейтронов (МЗН), который был разработан в Томском политехническом университете. О высокой точности определения урана МЗН свидетельствуют данные по аттестации стандартных образцов сравнения бывшего СССР, ГДР и современных стандартов МАГАТЭ. Этот метод был выбран нами как базовый для определения урана в горных породах, рудах и минералах [Вертман и др., 1977].

Достаточно хорошим методом многоэлементного анализа является инструментальный нейтронно-активационный анализ, который нами широко используется, так как в ТПУ имеется исследовательский ядерный реактор с хорошими характеристиками.

Гамма-спектрометрическое определение радиоактивных элементов в полевых условиях привлекло наше внимание исключительной экспрессностью, мобильностью, достаточно высокой чувствительностью и точностью для решения прикладных радиогеохимических задач. При соблюдении основных требований к получению информации гамма-спектрометрическим методом (учет геометрии измерения, возможного сдвига радиоактивного равновесия, флуктуации работы прибора) обеспечивается удовлетворительная воспроизводимость результатов.

Так, для определения урана (по радию) она составляет 10—20 отн.% при содержании урана 2—10 г/т; для тория — 15—30 % при содержании 3—20 г/т; для калия — 20 % при концентрациях 0.5—1.5 %. Эти метрологические параметры позволяют реализовать данный метод для решения многих прикладных задач радиогеохимии.

Использование данного метода позволяет не только применять статистический подход в радиогеохимических исследованиях (измерения могут вестись без ограничения, но, как правило, до получе-

**Метрологические параметры некоторых применяемых лабораторных методов анализа пород на уран и торий**

Метод	Масса пробы, г	Предел обнаружения, мас. %		Воспроизводимость, отн. %		Время анализа	Подготовка пробы
		уран	торий	уран	торий		
Люминесцентный, ЦАЛ-1	0.2	$3 \cdot 10^{-5}$	—	10	—	3 ч	Химическая
Люминесцентный, ЦАЛ-2	1.0	$5 \cdot 10^{-6}$	—	13	—	6 ч	»
Фотоколориметрический	0.1	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	15	5—10	8—10 ч	»
Химический с весовым окончанием	1.0	$5 \cdot 10^{-3}$	—	5—10	—	1 ч	»
Рентгеноспектральный флуоресцентный	1—3	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	5—10	10	2 мин	Без химической подготовки
Гамма-спектрометрический по естественной радиоактивности	500	$2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	10—15	10—15	1 ч	То же
Инструментальный нейтронно-активационный гамма-спектрометрический	0.1	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	5—10	5—10	5 ч	»
Трековая осколочная радиография	0.01	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	15—50	15—50	24 ч	Специальная
Метод запаздывающих нейтронов	10	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-5}$	2—10	5—15	2.5 мин	Без подготовки

ния трех близких значений), но и корректировать проведение полевых работ, устанавливая тенденции и динамику изменения изучаемых параметров пород и руд непосредственно в процессе их геологического изучения, осуществлять более представительный отбор проб для лабораторных исследований.

Многочисленными экспериментами по определению радиохимических параметров геологических образований полевых гамма-спектрометрическим методом в различных вариантах (метод конверта, усредненный линейный и т. д.) получены близкие результаты, отличающиеся на 15—20 %. Более того, проводимые на одной и той же контрольной площадке измерения уровней накопления естественных радиоактивных элементов разными приборами одного типа в разные годы давали удовлетворительные результаты, различающиеся не более чем на 15—25 %.

Таким образом, с помощью полевых и лабораторных методов определения урана и тория, по нашему мнению, получены надежные данные для последующей радиохимической типизации рудно-магматических систем и генетических построений. Исключение составляет метод флуоресцентного рентгеноспектрального анализа, который при наличии мешающих элементов (Ba, Sr, Pb, Hg, Sb, Bi и некоторые др.) дает существенные ошибки в определении содержания урана и тория.

В последние десятилетия в практику геохимических работ широко внедряется метод индуктивно связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием (ICP-MS), который определяет широкий спектр элементов, в том числе Th и U, с весьма хорошими метрологическими параметрами. В наших исследованиях он практически не использовался, но его результаты явились источником информации при анализе репрезентативности тех или иных геологических выборок с точки зрения их правильности.

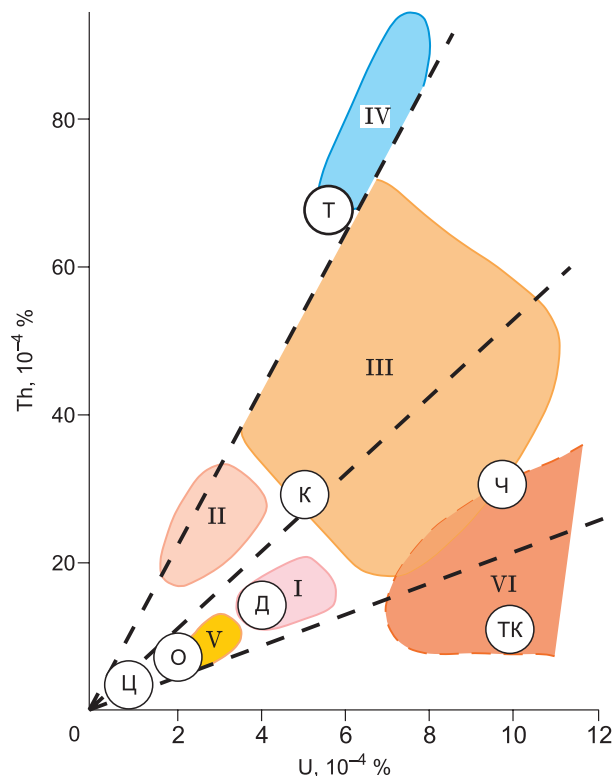
Средние содержания радиоэлементов в горных породах, рудах и минералах рассчитывались по результатам как минимум двух независимых методов их определения, имеющим сходимость на уровне 10—30 %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема геохимической типизации гранитоидов обсуждается в литературе на протяжении многих десятилетий [Таусон, 1961, 1977]. Следует отметить, что уже в 50-е годы XX века появились классификации этих пород по уровням накопления в них урана и тория. Первая радиохимическая классификация гранитоидов СССР была предложена Л.В. Комлевым в 1950 г. в закрытой докторской диссертации, в которой он выделил радиохимические группы пород, определил их потенциально рудоносный тип и дал на основании этого прогноз районов, перспективных на выявление урановых месторождений на Украине и Средней Азии.

Для широкой геологической общественности эта работа стала известна после публикации [Смыслов, 1974]. На подобного типа диаграммах [Рихванов, 2002; и др.] достаточно хорошо просматривается группировка гранитоидов по общей металлогенической специализации (рис. 1).

Уже на этом этапе работ могут быть выделены группы массивов, комплексов, отличающиеся радиохимическими особенностями. Так, в Кузнецком Алатау достаточно хорошо локализируются центральный, дудетский и ольгинский типы золотоносных интрузий, а в Горном Алтае комплекс (калгутинский и др.) ред-



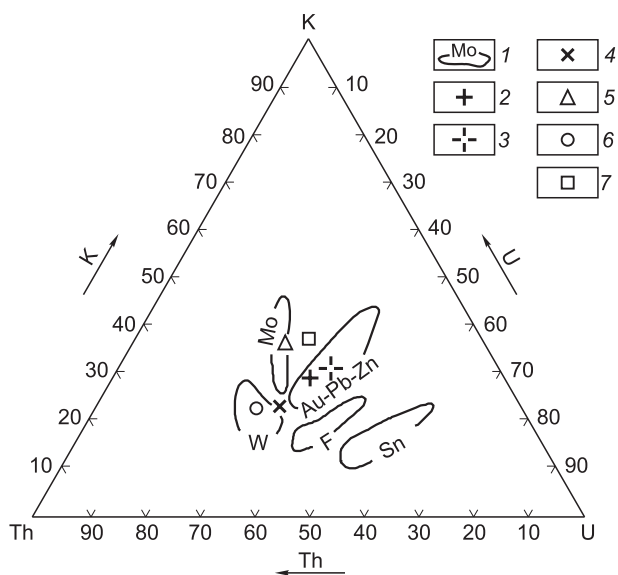
**Рис. 1. Главнейшие радиохимические типы гранитов и положение на них некоторых гранитоидных образований АССО (по [Смыслов, 1974] с дополнениями автора).**

Поля геохимических типов гранитоидов: I — нормально-радиоактивные граниты,  $Th/U = 2.5-4.5$ ; II — повышено-радиоактивные граниты,  $Th/U = 6-10$ ; III — высокордиоактивные редкометалльные граниты,  $Th/U > 5-10$ ; IV — высокордиоактивные ториеносные граниты,  $Th/U > 10$ ; V — слабордиоактивные плагιοграниты,  $Th/U < 2-5$ ; VI — высокордиоактивные существенно ураноносные граниты,  $Th/U = 1-2$ .

Гранитоиды АССО: Т — Таракский массив; Д — дудетский (тигертышский) подтип (андатский, саралинский и др.); О — ольгинский подтип (карлыганский, колодзюльский и др.); Ч — чебулинский комплекс; К — Калгутинский массив; ТК — талицко-каракольский тип гранитоидов; ц — центральный тип.

**Рис. 2. Положение полей гранитоидов на тройной диаграмме U—Th—K.**

1 — металлогенический тип гранитоидов Забайкалья; 2—7 массивы гранитоидов восточного склона Кузнецкого Алатау: 2 — Улень-Туимский, 3 — Солгонский, 4 — Аскизский, 5 — Сайгачинский, 6 — Юлинский, 7 — Котурский.



кометалльных гранитоидов. Особняком на них выделяются монацитоносные таракские (IV группа) и уран-редкометалльно-редкоземельные талицко-каракольские и чебулинские гранитоиды Алтая и Кузнецкого Алатау, которые локализуются в поле ураноносных гранитоидов.

Следует отметить, что по материалам европейских исследователей, выделяемые ими гранитоиды высокой теплогенерации относятся к VI группе данной классификации. С ними они связывают формирование некоторых типов урановых месторождений [Симпсон, Плант, 1988].

Для разбраковки гранитоидов различной металлогенической специализации по радиогеохимическим данным интерес представляет тройная диаграмма U—Th—K, широко используемая при интерпретации аэроспектрометрических данных. Так, проведенная М.П. Николаенко и другими исследователями в Забайкалье металлогеническая типизация позволила выделить ряд полей гранитоидов, в пределах которых расположены те или иные типы эндогенных месторождений региона (рис. 2).

Радиогеохимические данные для ряда гранитоидных массивов восточного склона Кузнецкого Алатау, по нашей просьбе, были обработаны М.П. Николаенко. На диаграмме (см. рис. 2) обособились две группы образований, одна из которых попадает в группу золотоносных, а другая — молибденоносных гранитоидов Забайкалья. В полях развития этих пород локализуются также промышленные месторождения молибдена и золота АССО (Коммунар, Сарала, Сорское и др.). Из анализа этих материалов следует, что на восточном склоне Кузнецкого Алатау отсутствуют гранитоиды, в полях которых размещаются оловоносные и флюоритоносные проявления.

Концентрация радиоактивных элементов в гранитоидах, как показывают многочисленные исследования, является индикатором не только состава земной коры, в которой развивался магматический очаг [Ножкин, 1997], но и эволюции земной коры в целом [Ножкин, 1983; Ножкин, Рихванов, 2014; и др.]. Дифференциация земного вещества сопровождалась концентрацией редких и радиоактивных элементов — U, Th, K. В результате эволюции континентальная кора приобрела в среднем диоритовый состав, а верхний ее слой гранодиоритовый [Тейлор, Мак-Леннон, 1988]. В сравнении с примитивной мантией континентальная кора обогащена радиоактивными элементами в 50—60 раз, а ее верхний гранитно-метаморфический слой в 150—160 раз. Высокорадиоактивные натрий-калиевые гранитоиды являются продуктами наивысшей степени геохимической дифференциации земного вещества. Они завершают крупные этапы формирования коры, становление и кратонизацию континентов.

Радиоактивные элементы в магматических породах, особенно гранитоидах, являются четкими индикаторами некоторых их геохимических типов, например А-типа, и потенциальной рудоносности [Stussi, 1970; Hennesy, 1981; Рихванов, 2002; и др.]. Когда говорят о гранитоидах А-типа, формирующихся во внутриплитных обстановках, то подразумевают, что они будут обогащены Th, U, Ta, REE и другими некогерентными редкими элементами. К таковым могут быть отнесены гранитоиды Аравийского щита или плато Джос (Нигерия) и др. [Солодов, Усова, 1986; Maurice, Charbonneau, 1987; Pollard, 1988]. В Алтае-Саянской складчатой области к таковым могут быть отнесены чебулинский комплекс и некоторые другие.

Величина отношения Th к U, как показывают наши [Рихванов, 2017] и другие исследования [Al-lègre et al., 1986; Hamilton, 1989; Озима, 1990], является чрезвычайно важным индикаторным показателем. Это отношение, начиная от Солнечной системы в целом ( $Th/U = 3.72$ ) до ее планет и Луны ( $Th/U = 3.55$ ), метеоритов ( $Th/U = 2.5—8.6$ ), магматических образований, находится в чрезвычайно узком интервале значений (2.5—5.5) при преобладании 3.5—4.5, что предполагает существование общей закономерности в распространении тория и урана, определяющейся законами мироздания [Рихванов, 2004].

Как отмечает В.И. Вернадский [1954], на факт постоянства соотношения тория и урана в земных образованиях обращали внимание Э. Розерфорд в 1904 г. и Б. Болтвуд в 1906 г., и он предлагал назвать эту выявленную закономерность законом Розерфорда—Болтвуда.

Иными словами, в природе тория, как правило, в 3—5 раз больше, чем урана. Эта система отношений выдерживается во многих горных породах, особенно магматических, за исключением пород хемо- и биогенного происхождения, а также продуктов метаморфизма и метасоматизма [Рихванов, 2002, 2004, 2017].

Чрезвычайно важным индикатором магматической природы гранитных пород является отношение Th/U, которое для магматических пород в большинстве случаев составляет 2.5—7.0. Это отношение, на наш взгляд, является критерием магматической природы тех или иных типов пород, обладающих в силу определенных обстоятельств конвергентными признаками.

Существуют попытки осмыслить радиогеохимические показатели пород с геодинамических позиций их формирования [Наумов и др., 2011], но эта проблема требует отдельного рассмотрения.

Одним из таких объектов, вызвавших в свое время дискуссию, являются магматические образования, выделенные в Монголии в районе месторождения Онгон-Хайерхан [Коваленко и др., 1971a]. К таким же породам, по методу аналогии, стали относить и близкие к ним породы, например, калгутитовый дайковый комплекс на Алтае и в других районах [Анникова, 2003; Владимиров и др., 2007].

Исследование радиогеохимических характеристик онгонитов и калгутитов, выполненное нами [Рихванов и др., 2017], показало, что дайковые породы, описанные под названием «онгониты» в Монголии, а их можно принять за петротип, являются радиогеохимически специализированным комплексом. Содержание урана составляет 5.7 г/т, а тория — 20.6 г/т при величине Th/U = 3.6, и по своим радиогеохимическим параметрам они близки к среднемировым гранитам [Tweedie, 1979].

По этим параметрам породы соответствуют классическим интрузивным образованиям, как это и утверждалось ранее при детальном геолого-минералого-геохимическом исследовании онгонитов Монголии [Коваленко и др., 1971a].

По этим параметрам исследованный нами петротип онгонитов соответствует гранитоидам вольфрамовой и олово-вольфрам-бериллий-урановой специализации [Stussi, 1970].

Выделенные как аналоги онгонитов дайковые образования под названием «калгутиты» в Горном Алтае [Анникова, 2003; Владимиров и др., 2007] не могут рассматриваться как таковые, так как они имеют принципиально иные радиогеохимические показатели (Th/U < 1), что, скорее всего, отражает высокую степень их метасоматической переработки, что мы видим и на радиогеохимической диаграмме (рис. 3).

Аналогичный вывод можно сделать и по Аллахинскому массиву, который был описан как новый сподуменовый тип гранитов [Кудрин и др., 1994].

Структурно-текстурные и некоторые вещественные особенности Аллахинского штока допускают различную интерпретацию его генезиса. Условия залегания гранитов, взаимоотношение с вмещающими породами, наличие эндоконтактных оторочек тонкозернистых пород, похожих на зоны закалки, могут свидетельствовать о магматическом характере их происхождения.

С другой стороны, ряд признаков: структурные взаимоотношения минералов, отражающие явления замещения и порфириобластеза; наличие постепенных переходов между различными минералого-петрографическими типами и некоторые другие признаки могут указывать на их метасоматическое происхождение. Геохимический спектр руд (присутствие Bi, Mo, Cu, W, Ag и др. микроэлементов) и соотношение между собой естественных радиоактивных элементов позволяют также предполагать метасоматическую природу этих образований.

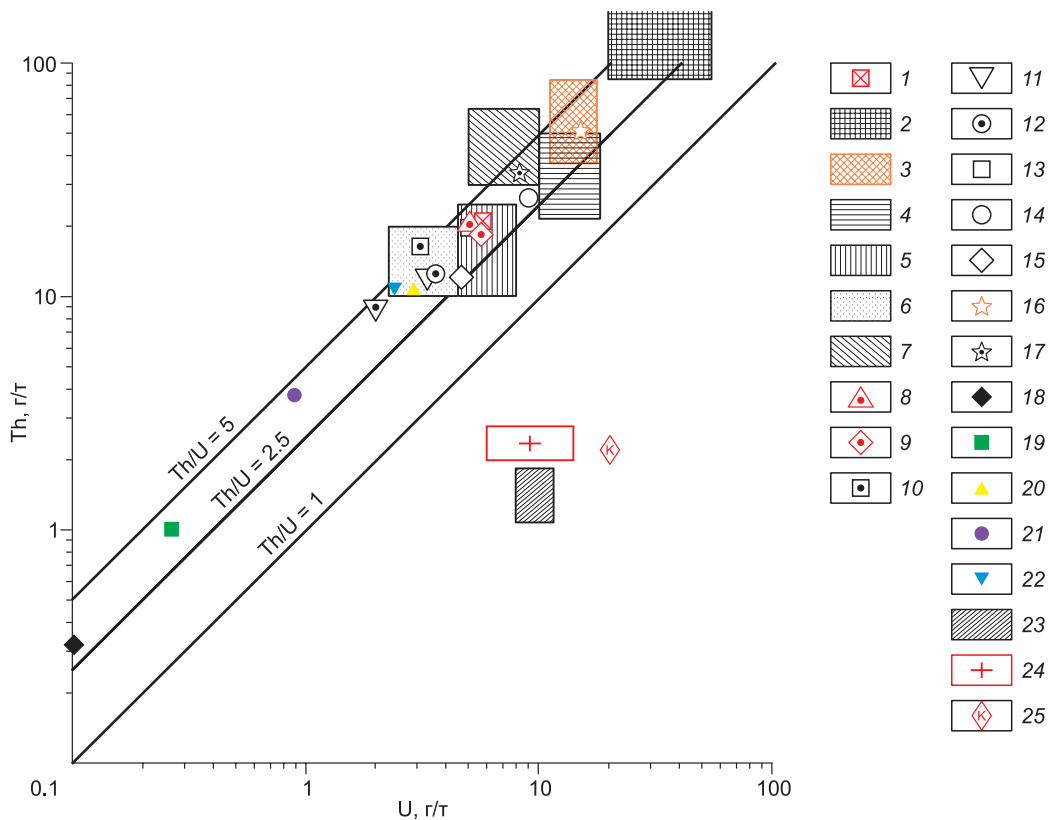
Так, на радиогеохимической диаграмме (см. рис. 3) поле Аллахинского штока занимает пространство, характеризующее метасоматически преобразованные породы с величиной торий-уранового отношения меньше единицы, что принципиально отличает их, например, от литийсодержащих гранитов Корсики [Bonin, 1988] и тантал-ниобиевых гранитов Нигерии [Солодов, Усова, 1986; Pollard, 1988], которые характеризуются величиной этого показателя, свойственной типичным магматическим образованиям [Рихванов, 2002].

Следует отметить, что такую же природу могут иметь некоторые гранитоиды Центральной Европы (например, массив Бовуар, Айбеншток), которые также находят место на Th-U диаграмме в поле гидротермально измененных пород (см. рис. 3).

Благодаря тому, что сегодня в практику работ внедряется метод ICP-MS, который прекрасно анализирует ЕРЭ, имеется уникальная возможность проверки репрезентативности представляемых выборок, которые закладываются в построение различных петрологических и геодинамических моделей по величине Th/U.

Так, анализ положения некоторых типов гранитоидов Монголии по радиогеохимическим признакам (рис. 4) показывает, что в Монголии, «стране гранитов», как ее называют, имеются различные типы этих пород, имеющие, как правило, магматическую природу.

Но существуют и геологические объекты, которые претерпели то или иное метасоматическое преобразование, и их сегодняшние петрогеохимические характеристики не отвечают первичным магматическим породам [Рихванов и др., 2013].



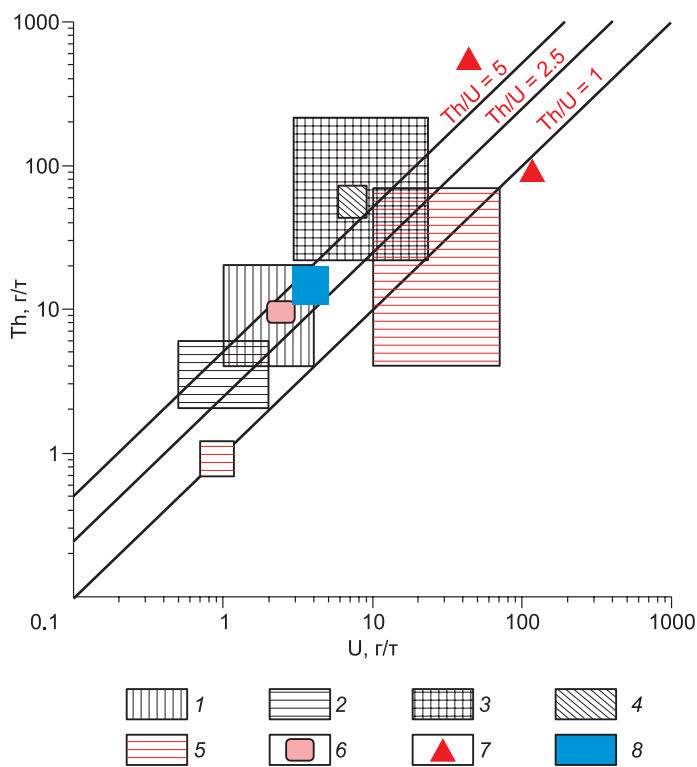
**Рис. 3. Радиогеохимическая типизация гранитоидов редкометалльной специализации.**

1 — онгониты из петротипа района месторождения Онгон-Хайерхан (Монголия); 2—7 — поля металлогенически специализированных гранитоидов: 2 — тантал-ниобиевые гранитоиды Нигерии [Рихванов, 2002]; 3 — литиевые граниты Корсики [Bonin, 1988]; 4 — олово-вольфрам-бериллиевые с литием и цезием, танталом и ниобием [Stussi, 1970]; 5 — олово-вольфрам-бериллий-урановые [Stussi et al., 1970]; 6 — вольфрамоносные [Stussi, 1970]; 7 — медно-молибден-вольфрамовые с ураном и торием [Stussi, 1970]; 8 — среднемировые граниты [Tweedie, 1979]; 9 — среднее для гранитоидов позднепалеозойско-мезозойской активизации Центральной Сибири [Рихванов, 2002]; 10 — гранитоиды Забайкалья (по данным В.И. Медведева и др.; материалы ГП «Сосновгеология» по радиогеохимическим исследованиям разных лет); 11 — вулканиты кислого состава Забайкалья (по данным В.И. Медведева и др.; материалы ГП «Сосновгеология»); 12 — ультракислые риолиты Горного Алтая (по материалам Ю.А. Тикунова); 13 — кислые стекла и риолиты Эфиопии [Рихванов, 2002]; 14 — риолиты Японии, стандарт JR-1; 15 — стандарт обсидиана, США; 16 — стандарт гранита NIMG, Африка; 17 — порфировидные граниты Алтая, в полях развития которых локализуются месторождения вольфрама; 18—22 — средние оценки содержания урана и тория [Тейлор, Мак-Леннон, 1988]: 18 — хондриты, 19 — нижняя континентальная кора, 20 — верхняя континентальная кора, 21 — континентальная кора в целом; 22 — пелагическая глина; 23 — топаз-риолитовый гранит Beauvois (Бовуар, Франция. Образец с гл. 400 м); 24 — среднее по сподуменовому типу танталоносных гранитов Алтая; 25 — среднее по «калгутитам» с месторождения Калгутинское, Алтай.

Наиболее ярко выраженными объектами такого типа являются массивы горы Халдзан-Буретгей, являющиеся вместилищем крупных запасов Zr, Nb, Ta, REE, Th и U, и Хан-Богдо. Одним из характерных признаков наличия метасоматических преобразований данных пород является чрезвычайно высокое разнообразие пород. Так, например, на горе Халдзан-Буретгей выделяются 8 минеральных фаз [Kovalenko et al., 1995], в том числе образовавшихся метасоматическим путем. Аналогичное замечание может быть сделано и по некоторым фазам одного из крупнейших в Центральной Азии массивов щелочных гранитоидов Хан-Богдо [Рихванов и др., 2013].

Весьма интересным с радиогеохимической точки зрения является анализ так называемых спайдер-диаграмм, которые сегодня получили широкое распространение. И в тех случаях, когда на них указаны радиоактивные элементы (рис. 5), можно судить с определенной долей вероятности о правильности отнесения изученного массива (комплекса) к интрузивным образованиям, и его петрохимические характеристики можно использовать для разнообразных модельных построений.

На приведенной диаграмме (см. рис. 5) достаточно хорошо видно, что из четырех массивов Li-F редкометалльных гранитов Монголии три имеют ториевую природу, характерную для интрузивных пород (Авдарский, Хэнтэйский, Хархиринский). Что касается массивов сложного строения, каковым является Жанчивланский массив, то представленные на диаграмме точки содержаний Th и U свидетельствуют



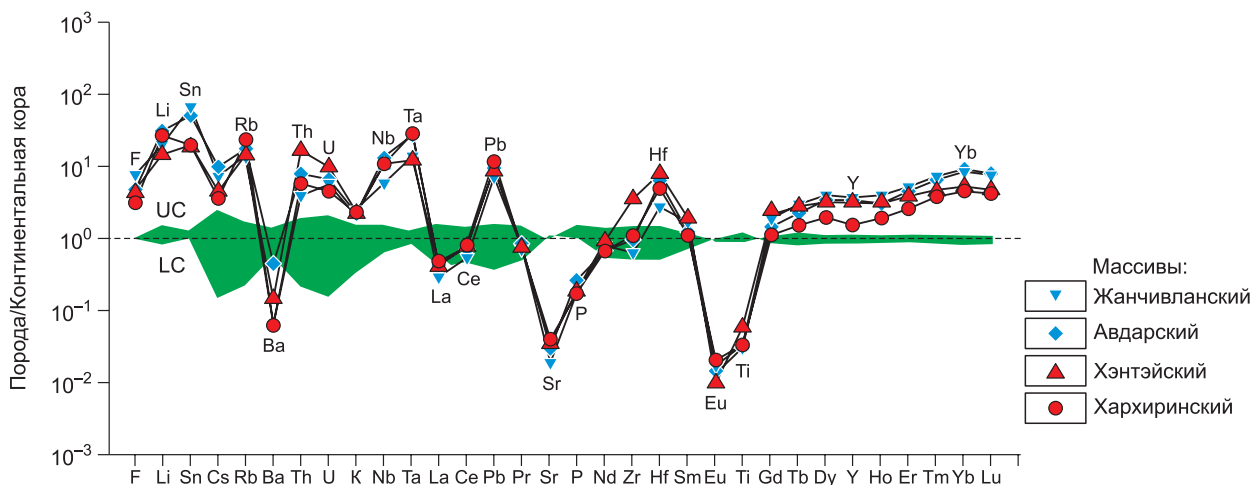
**Рис. 4. Радиогеохимическая типизация гранитоидов Монголии.**

1 — габбро-диорит-гранитный комплекс (Эрдэнэдаваа, Хамар Даваа, Гарган, Илчир), 2 — массивы гранитоидов Озерный (Ховд), Тургенский, 3 — гранитоиды Улаан Дэл, 4 — гранитоиды Тургенгольского блока, вблизи месторождения Асхатин, 5 — гранитоиды Хан-Богдо, 6 — массивы гранитоидов Агардагский, Алтайский, Ховдский, 7 — гранитоиды Халдзан-Буретгей, 8 — субщелочные гранитоиды Озерного террейна.

ют о том, что в данную выборку включены пробы, имеющие выраженную урановую природу, и, соответственно, первоначальные петрохимические характеристики данных интрузивных пород изменены. Какие породы попали в рассматриваемую выборку, по этому графику трудно судить.\* Но в пределах этого массива известны тела грейзенов, микроклинитов и альбититов [Коваленко и др., 1971б]. Не исключается, что в такого рода сложных массивах на конечных стадиях кристаллизации магмы в равновесии с ней могут находиться флюидные фазы, в которых уран преобладает над торием, что может сказаться

на радиогеохимических показателях пород. Но этот вопрос требует отдельного исследования.

Представляется, что во многих случаях в горно-таежных районах Сибири, когда невозможно выполнить детальные наблюдения, кварц-полевошпатовые метасоматиты (микроклиниты, альбититы и



**Рис. 5. Распределение редких элементов в различных массивах редкометалльных Li-F гранитов раннемезозойского ареала магматизма Монголии.**

Нормировано по среднему составу континентальной коры. LC, UC — средние составы нижней и верхней континентальной коры.

\* В 1969 г. с выдающимся российским петрологом Д.С. Коржинским были осмотрены субвулканические аналоги Li-F редкометалльных гранитов — онгониты, открытые В.И. Коваленко. Д.С. Коржинский хорошо представлял материал по Li-F гранитам Монголии и при обсуждении просмотренных обнажений высказал предположение, что в данном случае происходит последовательный переход от расплава во флюид, поэтому такой генезис пород можно назвать флюидно-магматическим. Это предположение Д.С. Коржинского в дальнейшем было подтверждено В.И. Коваленко.

В массивах Li-F гранитов наблюдаются взаимопереходы пород с типичными магматическими структурами в участки, переработанные в результате аутометасоматических процессов. Очевидно, судя по данным Л.П. Рихванова и Th/U отношениям, можно изучить этот процесс последовательного перехода от расплава во флюид при детальных исследованиях хорошо обнаженных массивов Li-F гранитов, которые имеются в Монголии (Прим. М.И. Кузьмина).



т.д.) зачастую принимаются и описываются как гранитоиды, пегматоиды с аномальными радиогеохимическими характеристиками. По-видимому, только этим можно объяснить низкое торий-урановое отношение в щелочных гранитоидах чебулинского комплекса и некоторых гранитоидах Алтая. Процессы автometасоматоза, столь необычайно широко развитые в щелочных гранитоидах, существенно исказили радиогеохимический фон, что особенно видно по низкой величине торий-уранового отношения в данных образованиях (средневзвешенная его величина ~2), что существенно ниже кларкового для земной коры и гранитов. Так, среднемировой гранит [Tweedie, 1979] имеет содержание U — 5, Th — 21 г/т при величине Th/U 4.2.

Однако в литературе зачастую на это не обращается внимание. Так, например, из 12 изученных массивов щелочных гранитоидов Восточного Саяна и Тувы (коллекции В.Н. Довгала и В.В. Минина) девять имеют торий-урановое отношение меньше 2, а такие массивы, как Дугдинский, Духунурский, Кодыросский, Хусунгольский и Академический, судя по представленным выборкам, имеют этот показатель на уровне единицы и менее, что однозначно свидетельствует о их глубокой метасоматической переработке.

Следует отметить намечающуюся прямую зависимость в изменении величины торий-уранового отношения и размера массивов. На наш взгляд, это объясняется более интенсивной автometасоматической переработкой мелких тел, часто представляющих собой апикальные части более крупных массивов, не вскрытых процессами эрозии, а возможного, и наложенного метасоматоза.

Выполненные нами проверки чистоты выборок магматических образований, охарактеризованных по содержанию радиоактивных элементов, по которым можно рассчитать величину торий-уранового отношения, свидетельствуют, что наряду с выборками, соответствующими нормальному магматическому типу (до 90 % выборок), встречаются и неотвечающие таковым (около 10 %). Использование их в петрологических и геодинамических моделях может приводить к ошибочным выводам.

## ВЫВОДЫ

Всеобщая распространенность радиоактивных элементов, их прекрасные ядерно-физические характеристики позволяют определять их в любых типах горных пород с достаточно высокими петрологическими свойствами.

Хорошо изученные геохимические закономерности миграции, рассеяния и накопления радиоэлементов, форм нахождения ЕРЭ в магматических породах позволяют быть уверенным, что они могут быть использованы как определенные индикаторы процессов кристаллизации и последующих преобразований.

На примере гранитоидов показано, что уровни накопления радиоактивных элементов отражают геохимические и металлогенические особенности. Достаточно четко выделяются породы, в полях которых локализуются золоторудные, молибденовые, вольфрамовые объекты. Весьма специфические радиогеохимические особенности имеют породы, относящиеся к А-типу.

Прототип литий-фтористых пород в районе месторождения Онгон-Хайерхан имеет ярко выраженные показатели по содержанию урана и тория: 5.7 и 20.6 г/т соответственно при величине торий-уранового отношения 3.6.

Чрезвычайно важным показателем является величина торий-уранового отношения. Для магматических пород этот показатель может быть критерием правильности отнесения исследуемых пород к этой группе. Если величина Th/U меньше 2 или менее 1, то однозначно можно утверждать, что изучаемая выборка относится не к интрузивным образованиям, а к метасоматическим или метасоматически преобразованным породам (Аллахинский массив, Горный Алтай; «калгутиты» и др.).

Радиогеохимические показатели, особенно значение Th/U, могут и должны использоваться как дополнительные индикаторы при изучении магматических пород, генезис которых дискусионен в силу широко проявленных явлений конвергенции и метасоматоза, а также на стадии предварительной геохимической типизации гранитоидов.

## ЛИТЕРАТУРА

**Анникова И.Ю.** Редкометалльные граниты, онгониты и эльваны Калгутинского массива, Южный Алтай (состав, связь с оруденением, петрогенетическая модель формирования): Автореф. дис.... к. г.-м. н. Новосибирск, ОИГТМ СО РАН, 2003, 20 с.

**Васюкова Е.А.** Петрология и флюидный режим формирования лампрофиров чуйского комплекса (Юго-Восточный Алтай—Северо-Западная Монголия). Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, 158 с.

**Вернадский В.И.** Избранные сочинения: в 5 т. Очерки геохимии. М., Изд-во АН СССР, 1954, т. 1. 696 с.

**Вертман Е.Г., Столбов Ю.М., Мещеряков Р.П.** О возможности применения метода определения урана по запаздывающим нейтронам в геохимических исследованиях // Геохимия, 1977, № 9, с. 1337—1347.

**Владимиров В.Г., Анникова И.Ю., Антипин В.С.** Онгонит-эльвановый магматизм Южной Сибири // Литосфера, 2007, № 4, с. 21—40.

**Ермолаев Н.П., Соборнов О.П.** Способ выражения радиогеохимических характеристик магматических горных пород в единой системе координат и его геохимическое приложение // Геохимия, 1973, № 6, с. 803—815.

**Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Антипов В.С., Петров Л.Л.** Топазсодержащий кварцевый кератофир (онгонит) — новая разновидность субвулканических жильных магматических пород // Докл. АН СССР, 1971а, т. 199, № 2, с. 430—433.

**Коваленко В.И., Кузьмин М.И., Зоненшайн Л.П., Нагибина М.С., Павленко А.С., Владыкин Н.С., Цэдэн Ц., Гундсамбезу Ц., Горегляд А.Г.** Редкометалльные гранитоиды Монголии (петрология, распределение редких элементов и генезис). М., Наука, 1971б, 240 с.

**Кудрин В.С., Ставров О.Д., Шурига Т.Н.** Новый сподуменовый тип танталоносных редкометалльных гранитов // Петрология, 1994, т. 2, № 1, с. 88—95.

**Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмлюк В.В.** Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород // Труды XI Международного семинара «Глубинный магматизм, его источники и плюмы». Иркутск, 2011, с. 130—167.

**Ножкин А.Д.** Геолого-геохимические признаки зрелости архейских комплексов и причины рудоносности континентальных блоков земной коры // Геология и геофизика, 1983 (8), с. 41—48.

**Ножкин А.Д.** Петрогеохимическая типизация докембрийских комплексов Сибири: Автореф. дис.... д. г.-м. н. Новосибирск, 1997, 98 с.

**Ножкин А.Д., Рихванов Л.П.** Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении // Геохимия, 2014, № 9, с. 1—20.

**Озима М.** Глобальная эволюция Земли. М., Мир, 1990, 165 с.

**Основные** черты геохимии урана / Ред. А.П. Виноградов. Томск, Изд-во СГТУ, 2013, 374 с.

**Рихванов Л.П.** Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002, 536 с.

**Рихванов Л.П.** Радиоактивные элементы в геосферных оболочках // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы II Международ. конф. Томск, 18—22 октября 2004 г., Томск, Тандем-Арт, 2004, с. 498—505.

**Рихванов Л.П.** Радиоактивность и радиоактивные элементы как фактор геологической среды и его использование в науках о земле // Разведка и охрана недр, 2017, № 12, с. 55—61.

**Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Галнэмэх О., Машенькин В.С., Бат-Улзий Д., Гэрэл О., Оюунбат С., Гарамжав Д.** Радиогеохимические особенности некоторых гранитоидов Монголии и их редкометалльное оруденение // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека. Материалы IV Международ. конф. Томск, 4—8 июня 2013 г., Томск. Изд-во ТПУ, 2013, с. 451—456.

**Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Батулзий Д.** Новые данные по геохимии онгонитов // Геосферные исследования, 2017, № 1, с. 50—59.

**Симпсон П.Р., Плант Дж.А.** Роль гранитов высокой теплогенерации в формировании урановых провинций // Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождений урана. М., Изд-во «Мир», 1988, с. 286—303.

**Смыслов А.А.** Уран и торий в земной коре. Л., Недра, 1974, 231 с.

**Солодов Н.А., Усова Т.Ю.** Рудоносность щелочных гранитов. М., ВИЭМС, 1986, 63 с.

**Таусон Л.В.** Геохимия редких элементов в гранитоидах. М., Изд-во АН СССР, 1961, 285 с.

**Таусон Л.В.** Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М., Наука, 1977, 280 с.

**Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция. М., Мир, 1988.

**Allègre C.V., Dupre B., Lewin E.** Thorium/uranium ratio of the Earth // Chem. Geol., 1986, v. 56, № 3—4, p. 219—227.

**Bonin B.** Peralkaline granites in Corsica: some petrological and geochemical constraints // Rend. Soc. Ital. Miner. Petrol., 1988, v. 43, № 2, p. 281—306.

**Hamilton E.I.** Terrestrial radiation — an overview // Radiat. Phys. Chem., 1989, v. 34, № 2, p. 195—212.

**Hennesy J.** A classification of British Caledonian granites based on uranium and thorium contents // Miner. Mag., 1981, v. 44, № 336, p. 449—454.

**Kovalenko V.I., Tsaryeva G.M., Goreglyad A.V., Yarmolyuk V.V., Troitsky V.A., Hervig R.L., Farmer G.L.** The peralkaline granite-related Khaldzan-Buregtey rare metal (Zr, Nb, REE) deposit, western Mongolia // *Econ. Geol.*, 1995, v. 90, p. 530—547.

**Maurice Y.T., Charbonneau B.W.** U and Th concentration processes in Canadian granitoids, their detection by airborne gamma ray spectrometry and their relationship to granophile mineralization // *Revista Brasileira de Geociências*, 1987, v. 17, № 4, p. 644—646.

**Pollard J.I.** Petrogenesis of tin-bearing granites of the Emuford district, Herberton tinfield, Australia // *Austral. J. Earth Sci.*, 1988, v. 35, № 1, p. 39—57.

**Stussi J.-M.** Rôles et significations du zircon et de la thorite dans la géochimie de l'uranium et du thorium des roches volcaniques associées au Culm des Vosges méridionales C.R. Acad. Sci. Paris, 1970, v. 271, p. 2255—2258.

**Tweedie O.R.** Origin of uranium and other metal enrichments in the Helmsdale Granite, Eastern Sutherland, Scotland // *Trans. Inst. Min. Metall., Sect. B*, 1979, v. 88, p. 38—45.

*Рекомендована к печати 26 июля 2018 г.  
М.И. Кузьминым*

*Поступила в редакцию  
20 марта 2018 г.*