

Отходами производства будут являться рудные хвосты в виде фосфогипса, которые планируется закладывать в отработанное пространство карьера, а также железистый кек с содержанием 180 г/т скандия. Кек планируется складировать для будущей переработки на скандий. Основная доля в товарной продукции приходится на суперфосфат (53 %), далее следуют урановый концентрат (17,6 %), сульфат натрия (10,8 %) и редкоземельный концентрат (9,6 %).

Расчеты выполнены при ставке дисконтирования в размере 10 и 15 %. Срок обеспеченности рудника запасами составляет 39 лет. Принятый горизонт расчета равен 17 годам. Выполненные технико-экономические расчеты (табл. 3) свидетельствуют об экономической эффективности отработки запасов Шаргадыкского месторождения. При ставке дисконтирования 10 % ЧДД равен 2661,4 млн руб.; индекс доходности — 1,2; внутренняя норма доходности — 14,4 %; дисконтированный срок окупаемости капитальных вложений — 9,5 лет; дисконтированная бюджетная эффективность — 4607,1 млн руб.

Основные выводы по результатам проведенных опытных работ сводятся к следующему.

По рыночному сценарию получение урана из фосфатов начнется, как только этот процесс станет выгодным экономически.

Промышленное освоение Шаргадыкского месторождения комплексных фосфор-редкоземельно-урановых руд представляется экономически целесооб-

разным. Проект характеризуется достаточно высокими интегральными показателями как коммерческой, так и бюджетной эффективности при коэффициенте дисконтирования 10 %, но при этом находится на грани окупаемости при применении нормы дисконта 15 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гидрометаллургическая переработка уранорудного сырья* / Под ред. Д.И. Скороварова. — М.: Атомиздат, 1979. — 280 с.
2. *Ласкорин, Б.Н.* Добыча и переработка урановых руд в СССР / Б.Н. Ласкорин, В.А. Мамилов, Д.И. Скороваров, Л.И. Водолазов и др. // *Атомная энергия*. — 1983. — Т. 4. — Вып. 4. — С. 286–292.
3. *Никонов, В.И.* Разработка технологических решений для переработки уранофосфорных руд / В.И. Никонов, К.М. Смирнов, Ю.А. Меньшиков, О.К. Крылова, В.А. Маликов / В сб.: ВНИИХТ-60 лет. / Под ред. Г.А. Сарычева. — М.: ООО «Леонардо-Дизайн», 2011. — С. 145–149.
4. *Практика переработки уранового сырья* / Под ред. Г.А. Машковцева. — М.: ВИМС, 2008. — 269 с.
5. *Ситнова, М.* Минерально-сырьевая база и рынок фосфатов в СНГ (Семинар № 25 симпозиума «Неделя горняка-2007») / М. Ситнова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2008. — С. 359 — 364.
6. *Uranium 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*. — OECD 2016, NEA No.7301.
7. *Patrice Bruneton* — Unconventional Uranium Resources: Challenges and Opportunities. UNFC Workshop, Santiago, Chile, 9 — 12 July 2013.

© Коллектив авторов, 2017

Авдонин Геннадий Иванович // gosha1956@mail.ru
Гуров Владимир Алексеевич // guvalex@bk.ru
Мамошин Михаил Юрьевич // luiso_lucciccio@mail.ru
Пикалова Варвара Сергеевна // pikalova@vims-geo.ru

ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.42; 546.72: 504.05/63

Рихванов Л.П. (Национальный исследовательский Томский политехнический университет)

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ФАКТОР ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В НАУКАХ О ЗЕМЛЕ

Обсуждается всеобщая распространенность естественных радионуклидов. Показана индикаторная роль естественных радиоактивных элементов для решения вопросов генезиса магматических и метасоматических пород, понимания процессов флюидогенного рудообразования и их использования для целей прогнозирования месторождений полезных ископаемых различных типов (урановых, редкометалльных, золоторудных, нефти и газа и др.). **Ключевые слова:** уран, торий, радиоактивность, всеобщая распространенность, индикаторная роль, магматизм, метасоматоз, рудообразование, радиогеохимические признаки.

Rikhvanov L.P. (National research Tomsk Polytechnic University) RADIOACTIVITY AND RADIOACTIVE ELEMENTS AS THE FACTOR OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT AND HIS USE IN SCIENCES ABOUT THE EARTH

The article discusses the universal abundance of natural radionuclides. We have shown the indicative properties of natural radioactive elements for the solution of the problems devoted to genesis of magmatic and metasomatic rocks, fluid-based ore formation processes and their use for the purposes of forecasting of various mineral deposits (uranium, rare metals, gold, oil and gas, etc.). **Keywords:** uranium, thorium, radioactivity, global abundance, indicative role, magmatism, metasomatism, ore formation, radiogeochemical features.

С момента открытия в 1896 г. гражданином Франции Анри Беккерелем явления радиоактивности и носителей этого явления — радиоактивных элементов, обстоятельно изученных Марией и Пьером Кюри, стало ясно, что «...это открытие произвело огромный переворот в научном мировоззрении, поставило перед жизнью и техникой практически новые задачи совершенно

нового рода. Открыло горизонты возможностей, совершенно неожиданных и, казалось, навсегда для человечества закрытых» (В.И. Вернадский. Задачи дня в области радия, 1911. — с.61–72).

Познание этого явления позволило решить ряд фундаментальных проблем естествознания и, прежде всего:

- 1) определить новые источники энергии на планете;
- 2) установить пространственно-временную связь материи и энергии;
- 3) сформулировать представление о конечном бытии химических элементов («бренности атомов»).

Установленный закон радиоактивного распада позволил, в конечном итоге, определить время нуклеосинтеза (по модели внезапного нуклеосинтеза) — $6,4 \times 10^9$ лет, образования Солнечной системы и планеты Земля — $4,55 \times 10^9$ лет, возраст пород, руд и минералов. Если на первых порах развития ядерной геохронологии существовали грубые методы (калий-аргоновый, уран-свинцовый, гелиевый и др.), которые имели значительное ограничение и существенные ошибки в определении возраста, то со временем, с появлением новой лабораторной базы, с уточнением констант радиоактивного распада появились более современные (рубий-стронциевые, самарий-неодимиевые, аргон-аргоновые и др.) методы геохронологии, позволяющие определять возраст природных объектов.

На сегодняшний день носителей явления радиоактивности — радиоактивных элементов и их изотопов — во всех материальных объектах реального мира, его геосферных оболочках насчитывается многие сотни. По существу, все химические элементы таблицы Д.И. Менделеева имеют радиоактивные изотопы. Одни из них были присущи природным объектам всегда, другие в небольшом количестве формировались в результате взаимодействия природных атомов с космическим излучением, а значительная часть радиоизотопов и радиоэлементов являются продуктом рукотворной деятельности человека, называющего себя «Homo Sapiens», который создает новую геосферную оболочку под названием ноосфера. Благодаря уникальному свойству радиоактивных элементов переходить из неравновесного состояния в равновесное с испусканием гамма-квантов или заряженных частиц (а, б) определенной энергии, эти компоненты сравнительно легко идентифицируются в любых природных объектах, что позволяет широко использовать их как определенные индикаторы.

«Всюдность» радиоактивных элементов в материальном мире на сегодняшний день хорошо показана многими поколениями ученых. В справочниках или энциклопедиях по геофизике и по геохимии нам будут предложены кларки содержаний (или их оценочный уровень) радиоактивных элементов, а также радиоактивных изотопов стабильных химических элементов. Сегодня можно утверждать, что радиоактивность является фундаментальным свойством материи, а ее носители, в тех или иных количествах, встречаются абсолютно во всех материальных объектах, в том числе компонентах геологической среды (твердой, жидкой и газообразной).

Более того, с высокой степенью вероятности можно предполагать, что появление живой материи и ее эволюция в какой-то мере были обусловлены наличием радиационного фактора. А в качестве энергетического источника в живой клетке мог выступать, например, радиоактивный изотоп калия (K^{40}), являющийся β -излучателем с большим периодом полураспада.

Открытие явления радиоактивности и радиоактивных элементов предопределило новые научные направления, такие как «Ядерная физика», «Радиогеология», «Радиогеохимия» и др., которые кардинально изменили представление человека о материальном мире.

Так, академик А.Е. Ферсман отмечал, что «...Радиогеохимия дала геохимическим наукам больше чем многие другие дисциплины: она не только первая и с огромной точностью подошла к проблеме количественной оценки урана, тория и их семейств, не только дала понимание их пространственного распределения в отдельных геосферах, но, что особенно важно, дала методику точнейших радиоактивных исследований, которая оказалась применимой в качестве индикатора к ряду нерадиоактивных элементов. Мы поймем, как велики будут те достижения, которые получит геохимия, если она тесно и методологически будет связана с успехами радиогеохимии и вообще с изучением радиоактивных элементов и их миграции...».

Геохимия естественных радиоактивных элементов и, прежде всего, урана и тория в природных объектах различных геосферных оболочек планеты изучена сравнительно полно. Прежде всего это касается литосферы. Работами отечественных геологов В.И. Вернадского, А.П. Виноградова, Д.И. Щербакова, В.И. Баранова, В.И. Герасимовского, А.И. Перельмана, В.В. Щербинь, Л.В. Таусона, Л.В. Комлева, И.Е. Старика, В.Г. Хлопина, А.И. Тугаринова, Я.И. Белевцева, Н.П. Ермолаева, Г.В. Войткевича, А.И. Германова, В.В. Чердынцева, Г.П. Киселева, Н.Г. Сыромятникова, А.А. Смылова, М.Н. Альтгаузена, Ф.А. Алексеева, Р.П. Готтих, Е.Б. Высокоостровской, Н.А. Титаевой, С.Г. Неручева, Е.В. Плющева, Г.Б. Наумова и многих других, а также зарубежных специалистов: Adams, Allegre, Larsen, Rodgers, Lovering, Sackett, Rosholt, Husmann, Heier, Davis, Tatsumoto, Hamilton, Vine, M. Pagel e.a. установлены определенные закономерности их поведения и накопления в тех или иных геологических процессах.

На сегодняшний день установлены определенные закономерности в поведении главных естественных элементов — тория и урана [9,11,12 и др.].

Так, например, в ряду нарастающей кремнекислотности-щелочности содержание урана и тория возрастает, достигая своего максимума в щелочных гранитах [9 и др.]. Эта закономерность может нарушаться только в щелочных, щелочно-ультраосновных и ультраосновных породах [9, 12 и др.]. Нами [5] зафиксированы в щелочно-ультраосновных породах (анкаратритах) Ербинского некка содержание естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ) на уровне щелочных гранитоидов ($U — 8,5$ г/т; $Th — 25,7$ г/т; $K — 1,6$ %), а в породах лампрофирового типа Алтай установлены аномальные

концентрации этих элементов в еще больших концентрациях: (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 (А.С. Митропольский, С.В. Мельгунов, Е.А. Васюкова и др.), что свидетельствует о чрезвычайно специфических геохимических обстановках на границе земная кора-верхняя мантия и геодинамических условиях их формирования. Была выявлена статистическая взаимосвязь между ЕРЭ и петрохимическими показателями магматических пород, что позволило Н.П. Ермолаеву и О.П. Соборнову в 1973 г. предложить радиогеохимический ключ к определителю этих пород в координатах а-Q, используемых в петрохимической классификации А.Н. Заварицкого.

Достаточно уверенно просматривается тенденция возрастания ЕРЭ от ранних магматических комплексов или фаз к поздним, что отражает общую закономерность обогащения ураном и торием остаточных расплавов. Л.В. Таусоном были определены понятия минералы-носители и минералы-концентраторы, им и другими исследователями выделены основные формы нахождения урана в породах и минералах [3, 4, 9 и др.].

Радиоактивные элементы в магматических породах, особенно в гранитоидах, являются четкими индикаторами геодинамических обстановок их формирования и потенциальной рудоносности [2, 5 и др.]. Следует отметить, что уже в 1950-е годы появились классификации этих пород по уровням накопления в них урана и тория. Первая радиогеохимическая классификация гранитоидов СССР была предложена Л.В. Комлевым (1950) в закрытой докторской диссертации, в которой он выделил пять групп пород, определил потенциально рудоносный их тип и дал на основании этого прогноз районов, перспективных на выявление урановых месторождений на Украине и Средней Азии:

1. Нормальные радиоактивные граниты ($\text{Th}/\text{U} = 2,5\text{--}4,5$) с кларковым содержанием радиоэлементов.
2. Повышенные радиоактивные граниты ($\text{Th}/\text{U} > 6\text{--}10$).
3. Высокорадиоактивные лейкократовые граниты ($\text{Th}/\text{U} > 5\text{--}10$) с выше кларковым содержанием урана и тория.
4. Высокорадиоактивные существенно ториеносные аляскитовые граниты ($\text{Th}/\text{U} > 10$).
5. Слабордиоактивные граниты, богатые кальцием и натрием (плагиограниты) и с ниже кларковым содержанием урана ($\text{Th}/\text{U} = 2\text{--}5$).

Позднее к этим группам А.А. Смыслов [9] добавил шестую радиогеохимическую разновидность: существенно ураноносные гранитоиды (с величиной $\text{Th}/\text{U} = 1\text{--}2$). Европейские исследователи относят их к гранитам высокой теплогенерации и связывают с ними формирование некоторых типов урановых месторождений.

Территории развития высокорадиоактивных пород уже в начале XX века рассматривались В.И. Вернадским перспективными на выявление промышленных залежей урановых руд, которые в тот период времени

рассматривались единственным поставщиком особо ценного элемента-Ra, цена которого была сказочно высока. И любые сообщения о находках высокордиоактивных образований, как например, сообщение инженера К.Ф. Егорова в 1914 г. в Известиях императорской Академии Наук создало огромный ажиотаж в Иркутске и предопределило работу Радиевой экспедиции Академии Наук на Байкале. Именно в этом районе В.И. Вернадский в образцах из коллекции К.Ф. Егорова выявил новый минерал урана — менделеевит [7].

Уже в 1930-е годы подошли к вопросу о создании карты радиоактивности России. Так, осенью 1932 г. на первой Всесоюзной конференции по радиоактивности Андрей Павлович Кириков дал первую сводку результатов поисковых работ по изучению радиоактивности территории государства, накопленных за многие годы в бывшем Геологическом комитете — ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ. Для составления ориентировочной карты распределения радиоактивных минералов на территории Союза (а она, судя по стенограмме, была продемонстрирована) им был применен так называемый аспирационный метод, позволивший в сравнительно короткий срок (от 500 до 1000 образцов в сутки) подвергнуть испытанию свыше ста тысяч образцов из экспонатов Геологического музея ЦНИГРИ-ВСЕГЕИ. Повышенная ионизация, указывающая на присутствие радиоактивных минералов, была установлена для 1 % ящиков Геологического музея. Особенно большое распространение радиоактивных минералов было отмечено для районов Забайкалья, Приморья, Минусинского округа. Актуален и для сегодняшнего дня вывод его доклада: «Особенно интересен район к северу от Байкала. По-видимому, образцы были запачканы невидимым налетом...» (*Фонды Радиевого Института, ф. 1, оп.1, д. 28*). Сегодня это один из перспективных ураноносных районов России, который находит яркое отражение на радиогеохимической карте страны, подготовленной ВСЕГЕИ в 2008 г.

В связи с интенсивным поиском урановых месторождений к началу 1970-х годов появилось значительное количество методов определения естественных радиоэлементов (люминесцентные, фотокolorиметрические, нейтронно-активационные, гамма-спектрометрические, метод запаздывающих нейтронов и др.), позволяющих с высокой степенью чувствительности и надежности определять данные элементы во всех природных объектах как в лабораторных, так и в полевых, в т.ч. дистанционных (аэро- и других) условиях. Это позволило чрезвычайно быстро получить большой объем информации по геохимии ЕРЭ в различных геологических процессах.

Впервые в открытой форме об этих данных обстоятельный разговор состоялся в 1972 г. на I Всесоюзном радиогеохимическом совещании в г. Новосибирск, в котором приняли участие все крупнейшие в этой области специалисты: А.И. Тугаринов, Л.В. Комлев, В.И. Герасимовский, А.А. Смыслов, Ф.П. Кренделев, Я.Н. Белевцев, Н.Н. Амшинский и многие другие. Позднее вопросы индикаторной роли ЕРЭ в геологических и других природных процессах обсуждались на

II Всесоюзном совещании в Душанбе (1975 г.), на III Всесоюзном совещании в Томске (1992 г.), а затем на Международных конференциях «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» в Томске (1996, 2004, 2009, 2013 и 2016 гг.).

Следует отметить, что не только уровни накопления радиоактивных элементов в природных образованиях представляют интерес для исследователей земных систем. Прежде всего, в прикладном и теоретическом аспекте важным показателем являются отношения валовых содержаний урана к торию (Th/U). Этот показатель, как свидетельствуют наши [5, 8] и другие исследования [12], 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 различного типа находится в чрезвычайно узком интервале величин (2,5–5 при преобладании 3,5–4,5), что заставляет предполагать существование общей закономерности в распростра-

нении тория и урана, определяющейся законами мироздания и развития нашей планеты (рис. 1). Величина торий-уранового отношения закономерно изменяется от 3,7 до 4,3 при эволюции магматизма в земной коре. Устанавливается взаимосвязанное изменение Th/U и Sm/Nd, что может свидетельствовать по мнению Ю.Д. Пушкарева и др. о прогрессирующем источении в магматическом источнике.

Как отмечает В.И. Вернадский, на факт постоянства соотношения тория и урана в земных образованиях обращали внимание Э. Розерфорд в 1904 г. и Б. Болтвуд в 1906 г., поэтому его справедливо надо было бы назвать законом Розерфорда-Болтвуда.

Эта система отношений выдерживается во многих типах горных пород (рис. 1) за исключением пород хемо- и биогенного происхождения, а также продуктов метаморфизма и метасоматизма.

Для магматических пород этот показатель может быть критерием правильности отнесения исследуемых пород к магматитам. Если величина Th/U меньше 2 или менее

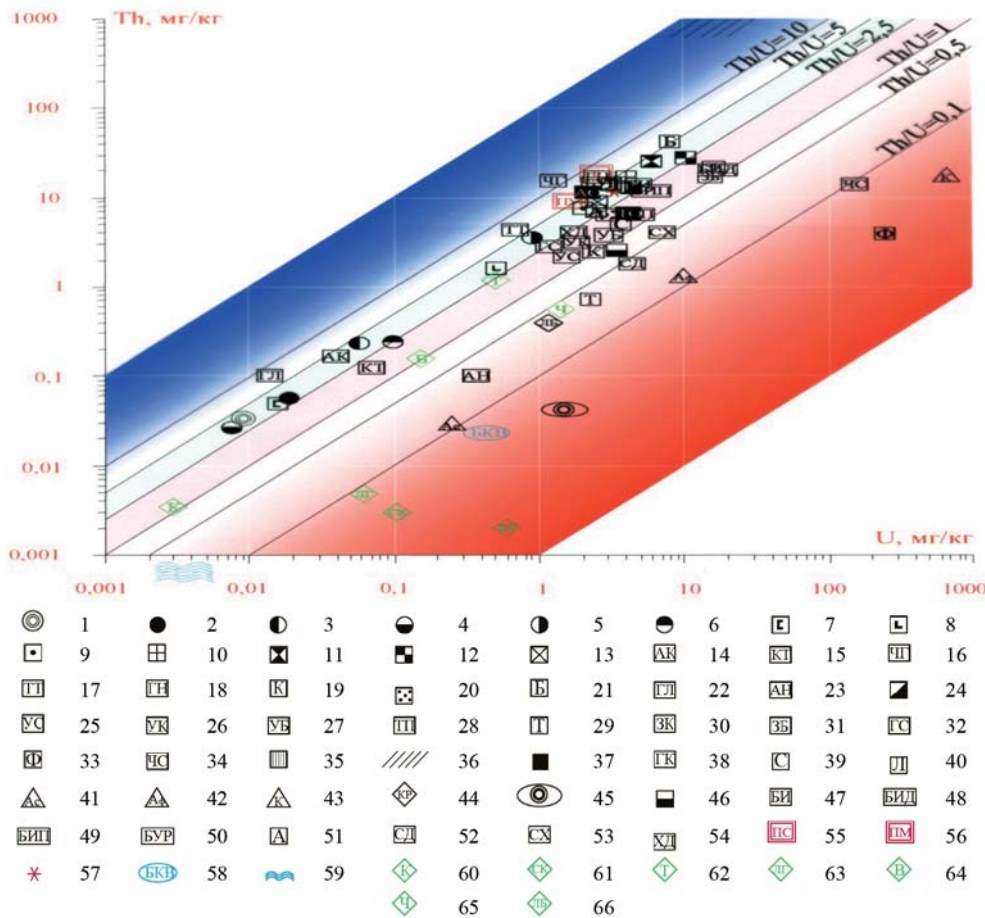


Рис. 1. Генерализованная схема радиогеохимических характеристик различных объектов гео-сферных оболочек. Составлена по различным опубликованным источникам, в том числе в приведенном списке литературы: 1 — Солнечная система; 2 — Земля; 3 — Луна; 4 — хондриты; 5 — валовый состав континентальной коры; 6 — океаническая кора; 7 — ультраосновные породы; 8 — основные породы; 9 — породы среднего состава (диориты); 10 — породы кислого состава (граниты); 11 — щелочные граниты; 12 — агаитовые нефелиновые сиениты; 13 — гранодиориты; 14 — алмазоносные кимберлиты, Африка; 15 — коматиты зеленокаменных поясов Сибири; 16 — породы чарнокит-гранулитовой формации; 17 — породы тоналит-трондьемитовой формации; 18 — гнейсы биотитовые; 19 — карбонатные породы; 20 — пески прибрежные; 21 — бокситы; 22 — галит; 23 — ангидрит; 24 — глины; 25 — уголь Сибири; 26 — уголь каменный; 27 — уголь бурый; 28 — торф погребенный (зольность 60 %), юг Сибири; 29 — торф юга Сибири; 30 — зола каменных углей; 31 — зола бурых углей; 32 — гипс; 33 — фосфориты; 34 — черные сланцы; 35 — сланцы обыкновенные; 36 — поле реализации монацитовых пляжных песков; 37 — крас-

ные глубоководные глины (ТО — Тихий океан; АО — Атлантический); 38 — глубоководные Fe-Mn конкреции дна Тихого океана; 39 — сапропель, юг Томской области; 40 — лессы Китая; 41 — асфальтены нефтей; 42 — асфальтиты нефтей; 43 — керогены нефтей; 44 — кораллы, южная часть Тихого океана; 45 — солевые отложения (накипь) из питьевых вод населенных пунктов Томского района; 46 — биогенные илы Тихого океана; 47 — глубоководные современные донные отложения оз. Байкал; 48 — пелит-диатомовые илы оз. Байкал; 49 — алевропелитовые илы оз. Байкал; 50 — донные отложения устья рек оз. Байкал; 51 — донные отложения оз. Телецкого, Алтай; 52 — донные отложения содовых озер, Алтай; 53 — донные отложения сульфатно-хлоридовых озер, Алтай; 54 — донные отложения хлоридных озер, Алтай; 55 — почвы юга Западной Сибири; 56 — почвы Мира; 57 — пылеаэрозольные выпадения; 58 — вода оз. Байкал; 59 — вода морская; 60 — плазма крови человека, юг Сибири; 61 — скорлупа дроздов, юг Сибири; 62 — зола травянистой растительности, юг Сибири; 63 — остромордая лягушка, юг Томской области; 64 — волосы детей, юг Сибири; 65 — зола черники, юг Сибири; 66 — зола лабазника, юг Сибири

1, то однозначно можно утверждать, что изучаемая выборка относится не к магматическим образованиям, а метасоматическим или метасоматически преобразованным породам [5, 8 и др.].

Исключение могут составить ультраосновные породы и примитивные океанические базальты, характеризующиеся низким уровнем ЕРЭ, и практически всегда находящиеся в стадии метасоматического (метаморфического) преобразования, в том числе при взаимодействии с океаническими водами.

В связи с тем, что современные аналитические методы (ICP-MS и др.) дают возможность определять уран и торий в породах, то при характеристике тех или иных петрохимических или металлогенических типов в научных публикациях существует возможность проверки правильности на чистоту ее соответствия характеризуемой выборки магматическому объекту. Например, в Горном Алтае В.С. Кудриным и др. был выделен новый тип редкометалльных литиевых гранитов (Аллахинский массив), но породы данного массива характеризуются аномально низкими отношениями тория к урану. Оно меньше 1 и это ставит под сомнение возможность выделения этого нового типа гранитоидов. Здесь имеет место проявление щелочного метасоматоза по граносиенитам. Аналогичная ситуация складывается и в других районах. Эта система отношений выдерживается во многих горных породах за исключением химических и биогенных типов осадков, продуктов метаморфизма и метасоматизма.

При формировании терригенных пород отчетливо просматривается тенденция возрастания содержания урана и тория в ряду: конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты, аргиллиты. И только в осадочных породах прибрежных фаций (пляжные пески), а также в породах, обогащенных органическим веществом и фосфором, эта тенденция нарушается. При этом многими исследователями отмечается прямая корреляционная связь между содержанием сапропелевого углеродистого вещества и фосфора с ураном и торием [6, 9 и др.]. Максимум накопления урана фиксируется в породах, где углеродистое вещество находится в форме асфальтитов, керитов, антраксолитов, при участии которых формируются породы так называемой черносланцевой формации, характеризующиеся не только

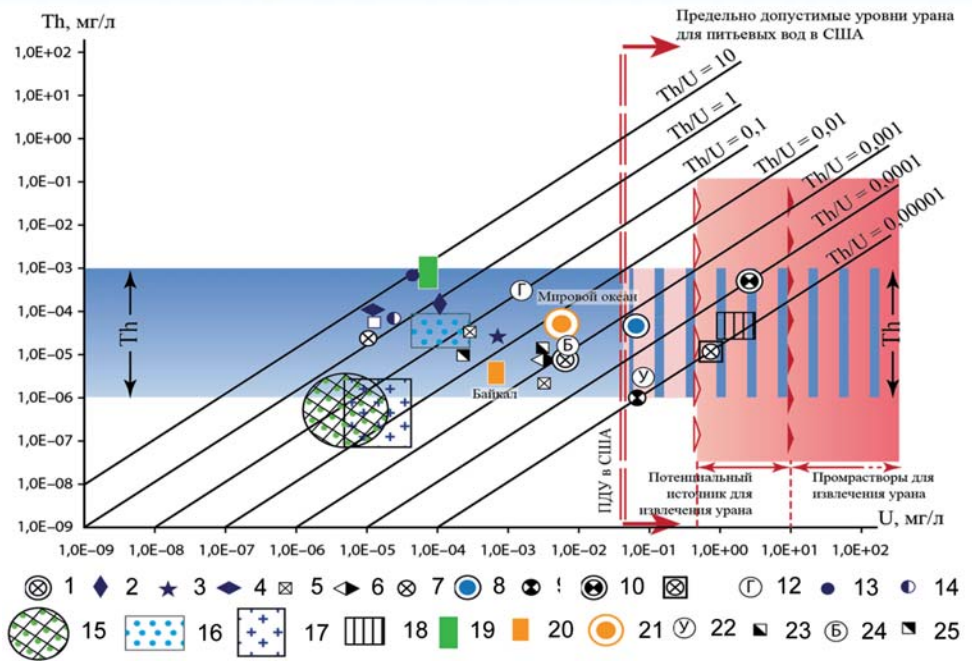


Рис. 2. Радиогеохимическая типизация воды: 1–11 — (данные по Ю.Г. Копыловой): 1 — радоновые источники Тувы; 2 — подземные воды Томского водозабора; 3 — среднее по водам Томского региона; 4 — воды Терсинского источника; 5 — пресные воды Республики Тува; 6 — воды р. Тугояковка, Томский регион; 7 — источник Уш-Бельдыр; 8 — минерализованные воды (рассол) озер Тувы; 9 — воды р. Улатай, Тува; 10 — воды ручья Арыскан, Тува; 11 — вода соленого озера Дус-Холь, Тува; 12 — Горхон, Прибайкалье; 13 — подземные рассолы Сибирской платформы (по А.Г. Вахромееву); 14 — Полярный Урал (по Н.В. Гусевой); 15 — снеготалые воды о. Шпицберген; 16 — снеготалые воды ледников Алтая, Актру; 17 — вода живых организмов, органы и ткани свиньи обыкновенной; 18 — соленые озера Монголии (по В.П. Юсупову и др.); 19 — грунтовая вода оазисов Бахария и Фарафре, Египет (по Adel Dabous); 20 — вода оз. Байкал; 21 — воды Мирового океана (по Р.А. Хорну); 22 — подземные воды г. Улан-Удэ; 23 — воды источника Арангатуй, район оз. Байкал; 24 — подземные воды Боргойской впадины, Бурятия; 25 — подземные воды Тунки, Восточный Саян

повышенной ураноносностью, но и высоким содержанием благородных и редких элементов. Таковой являются отложения баженовской свиты [6], в которых сосредоточено до 2–3 млрд т ресурсов урана.

Углистые породы и угли, как показывают данные Я.Э. Юдовича, М.П. Кетрис, С.И. Арбузова и др., только в редких случаях имеют аномально высокие содержания урана, а тем более тория. Они связаны, как правило, с наложенными эпигенетическими процессами — с окислением углей. В этих образованиях отсутствует прямая взаимосвязь радиоактивных элементов с органическим веществом, тогда как она выявляется с концентрацией редкоземельных и редких элементов.

Хемотронные и биогенные осадки, как правило, в значительной степени обогащены ураном, нежели торием. Поэтому эти образования характеризуются низкими показателями торий-уранового отношения. В целом это отражает основные отличительные черты геохимии урана и тория, в природе обусловленные состоянием валентности тория (только 4-валентное состояние в природе) и урана (4- и 6-валентное состояние), с образованием специфических природных соединений, например, нахождение 6-валентного урана в форме уранил-иона (UO^{+2}). Все это обуславливает их различную растворимость во флюидах [3]. Так, растворимость Th^{+4} и U^{+6} в воде различается на три порядка. Именно этот

фактор в сочетании с некоторыми другими обуславливает разделение геохимической судьбы U и Th в гидротермальных, экзогенных и биогенных процессах.

Отдельного рассмотрения требует проблема содержания урана и тория в воде. Работами А.И. Германова и др. [3] установлены основные закономерности накопления в ней урана. С появлением методов анализа тория в воде было установлено, что его концентрация на 2–4 порядка ниже чем урана и соответственно величина торий-уранового отношения много меньше единицы. Об этом можно судить по рис. 2, на котором отражены радиогеохимические типы природных вод по данным метода ICP-MS. При этом нами выявлен один удивительный тип вод — ториевый. С природой этого феномена предстоит еще разобраться.

Содержание урана резко преобладает над торием не только в морской и пресной воде (например, озеро Байкал), но и в плазме крови и живом веществе вообще. Живое вещество, как это отмечал В.И. Вернадский, выступает концентратором урана. И только в зольной составляющей биоты, например, в растениях или ороговиканном веществе (волосы) Th/U отношение достигает 1 и бывает даже выше.

Как показывают наши исследования (Е.Г. Язиков., Т.А. Монголина, Б.Р. Соктоев, Ш.Ж. Арынова и др.) важным показателем *качественных показателей* воды являются ее солевые отложения (накипь), образующиеся при многократном кипячении, отражающие на наш взгляд многие ее радиогеохимические особенности. При этом из более чем 1500 изученных на сегодняшний день проб значительная часть имеет величину торий-уранового отношения меньше 1 и в среднем составляет 0,01. В то же время есть солевые образования, имеющие ториевую специализацию. Причина этого пока не установлена, но, видимо, она зависит от формы переноса радионуклидов в воде.

Почвы вне зон техногенного воздействия, как правило, располагаются по линии Th/U отношения близкого к 3–4,5. В зонах техногенной трансформации почв этот показатель становится существенно ниже (2–2,5 и даже ниже). Этот показатель отклоняется от нормы и в зонах эпигенетического преобразования почв под воздействием флюидных потоков от залежей углеводородов, находящихся на глубинах несколько километров.

Наличие такого рода изменений радиогеохимических показателей и связанных с ними других показателей (термолюминисценция почв и специальных дозиметров и т.д.) позволяет разрабатывать новые подходы к прогнозированию, поискам и оценке месторождений углеводородов [10 и др.].

Еще одним чрезвычайно важным радиогеохимическим показателем является отношение изотопов урана-238 к урану-235 (U^{238}/U^{235}), которое является физической, на определенный момент времени, константой и определяется на данный период величиной 137,8. Отклонение от этого значения в ту или иную сторону свидетельствует о том, что либо происходили процессы ядерного деления с выгоранием U^{235} , как это, например, было на природных ядерных реакто-

рах, функционировавших 2,5–3,0 млрд лет назад на месторождениях урана Окло, Богомбо и других в Африке, либо имеет место воздействие предприятий ядерно-топливного цикла, занимающихся разделением изотопов урана. Но это уже относится к области радиоэкологии и в данной статье не рассматривается.

Не менее интересная индикаторная информация о геологических процессах получается при анализе изотопной системы U^{234}/U^{238} [11 и др.].

Подводя итоги многочисленных исследований по геохимии радиоактивных элементов в различных геологических процессах, выполненных только сибирскими учеными (Н.Н. Амшинский, А.С. Митропольский, Ф.П. Кренделев, В.М. Гавшин, В.П. Ковалев, В.А. Злобин, С.В. Мельгунов, Р.С. Журавлев, Д.К. Осипов, А.О. Пяллинг, А.Д. Ножкин, А.Г. Миронов, С.М. Жмодик, С.И. Арбузов, А.А. Поцелуев, А.М. Гофман, Ю.А. Фомин, В.А. Домаренко, В.В. Ершов, А.В. Волостнов и др.), можно констатировать, что радиоактивные элементы следует использовать в качестве «меченых атомов», с помощью которых можно решать вопросы стратиграфического расчленения осадочных и метаморфических толщ, магматических комплексов, определять их формационную принадлежность и геодинамические условия формирования, проводить типизацию рудно-магматических систем, разрабатывать критерии и признаки прогнозирования и поисков месторождений не только радиоактивного, но и нерадиоактивного сырья, например золота, углеводородов и др.

Ф.П. Кренделев и его коллеги [1] в своих исследованиях особо отмечали, что в зонах проявления гидротермально-метасоматических процессов увеличивается и дисперсия в распределении триады естественных радиоактивных элементов (ЕРЭ). При этом делается чрезвычайно важный фундаментальный теоретический и практический вывод о том, что «*в пределах однородного распределения ЕРЭ нельзя рассчитывать на обнаруже-*

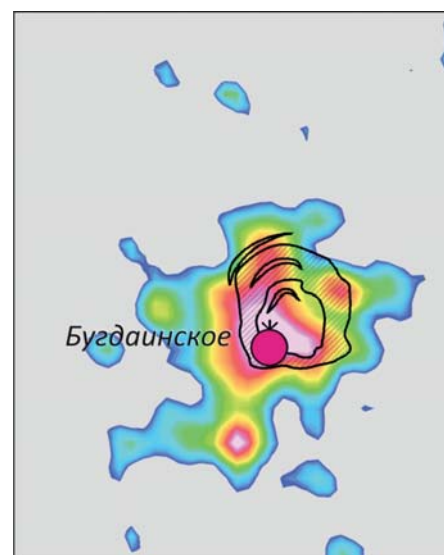


Рис. 3. Проявленность Бугдаинского молибденового месторождения порфирирового типа по данным АГСМ-съемки. Мультипликативный параметр $F=(U*K)/Th$ [4]

ние эндогенных концентраций нерадиоактивного рудного сырья». Это является парадигмой радиогеохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и не только рудных [10]. Так, например, нами показателями дисперсии распределения ЕРЭ, нарушение корреляционных связей между ЕРЭ и отношения ЕРЭ используются при прогнозировании и поисках месторождений углеводородов, разбраковке структур по степени их благоприятности для локализации углеводородов [10].

Весьма успешно радиогеохимические признаки проявления различных месторождений (углеводороды, золото, медно-никелевые и др.), выявляемыми методами аэрогамма-спектрометрии, разрабатывает Норильский филиал ВСЕГЕИ (Ф.Д. Лазарев и др.). Один из результатов их работ показан на рис. 3. Использование этого метода позволяет решать многие геологические задачи, в том числе и в нестандартных ситуациях. Например, при работах в полях развития траппового магматизма в Норильском районе, при прогнозировании и поисках месторождений платиноидов кингашского типа. Нами установлено, что рудоносные интрузии Норильско-Талнахского типа имеют достаточно четкие радиогеохимические особенности [5].

«Всюдность» радиоактивных элементов, их прекрасные ядерно-физические характеристики, позволяющие определять концентрацию радиоэлементов в любых объектах, наличие большого объема данных по общим геохимическим особенностям ЕРЭ в природных процессах и современные методы обработки информации позволяют быть уверенным, что естественные радиоактивные элементы и их изотопы (^{234}U , ^{210}Po , Rn и др.) использовались, используются и будут ис-

пользоваться как индикаторы для решения многих вопросов в науках о Земле, биологии и экологии, технологических процессах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кренделев, Ф.П. Применение гамма-спектрометрических методов для оконтуривания рудных зон в Забайкалье / Ф.П. Кренделев, А.Г. Миронов, А.М. Гофман // Геология и геофизика. — 1976. — № 8. — С. 67–75.
2. Ножкин, А.Д. Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении / А.Д. Ножкин, Л.П. Рихванов // Геохимия. — 2014. — № 9. — С. 1–20.
3. Основные черты геохимии урана / Под ред. А.П. Виноградова. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 352 с. 2-е изд., стереотипное, исправленное. — Томск: Из-во СГТУ, 2013. — 374 с.
4. Радиогеохимические исследования. Метод. рекомендации. — М.: МГ СССР, 1974. — 141 с.
5. Рихванов, Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований / Л.П. Рихванов — Новосибирск: Изд-во СО РАН филиал «Гео», 2003. — 536 с.
6. Рихванов, Л.П. Минералого-геохимические особенности баженовской свиты Западной Сибири по данным ядерно-физических и электронно-микроскопических методов исследований / Л.П. Рихванов, Д.Г. Усольцев, С.С. Ильенко, А.В. Ежова // Известия Томского политехнического университета. — 2015. — Т. 326. — № 1. — С. 50–63.
7. Рихванов, Л.П. Менделеевит: новые ракурсы исследования / Л.П. Рихванов // Природа. — 2016. — № 5. — С. 70–72.
8. Рихванов, Л.П. Новые данные по геохимии онгонитов / Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, Даш Батулзий / Геосферные исследования. — 2017. — № 1. — С. 50–59.
9. Смыслов, А.А. Уран и торий в земной коре / А.А. Смыслов — Л.: Недра, 1974. — 231 с.
10. Соболев, И.С. Прогнозирование и поиски месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами / И.С. Соболев, Л.П. Рихванов, Н.Г. Лященко // Геология нефти и газа. — 1999. — № 7–8. — С. 19–24.
11. Чердынцев, В.В. Ядерная вулканология / В.В. Чердынцев — М.: Наука, 1978. — 208 с.
12. Allegre, C.V. Torium/uranium ratio of the earth / C.V. Allegre, B. Dupre, E. Lewin // Chem Geol. — 1986. — V 56. — № 3–4. — С. 219–227.

© Рихванов Л.П., 2017

Рихванов Леонид Петрович // rikhvanov@tpu.ru

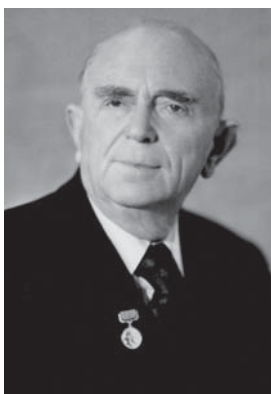
ХРОНИКА

К 110-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ Ф.И. ВОЛЬФСОНА

13 ноября 2017 г. геологическая общественность России и стран СНГ отметила знаменательную дату в истории отрасли — 110-летие со дня рождения выдающегося отечественного геолога-рудника, лауреата Ленинской Премии, доктора геолого-минералогических наук, профессора Федора (Файтеля) Иосифовича Вольфсона.

С именем Ф.И. Вольфсона связан ряд важных открытий месторождений стратегических видов минерального сырья, ставших основой работы предприятий цветной металлургии и атомной промышленности бывшего СССР и современной России.

Федор Иосифович Вольфсон по справедливости считается одним из ведущих специалистов в области учения о рудных месторождениях и о структурах рудных полей. Им опубликовано более ста восьмидесяти научных работ и трудов. Некоторые из них представляют собой моно-



графии, характеризующие геологию крупных территорий, в которых упор сделан на формирование геологических структур в связи с историей развития рудных районов. Это прогрессивное направление, важное для прогнозной оценки рудных месторождений, Ф.И. Вольфсон интенсивно развивал вместе с коллективом научных сотрудников, а также геологами-практиками, которых он постоянно консультировал и с некоторыми поддерживал самый тесный контакт. В период Великой Отечественной войны особенно ярко проявилась связь разрабатываемых Ф.И. Вольфсоном научных вопросов с прак-

тической деятельностью геологов. Он изучил находившиеся на грани закрытия свинцово-цинковые месторождения Карамазара (Средняя Азия), в результате выявились новые рудоносные участки и рудные тела, которые существенно увеличили запасы месторождений.