



РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КАК ИНДИКАТОР ПОРОДО- И РУДООБРАЗОВАНИЯ В РАЗВИТИИ ИДЕЙ Ф. Н. ШАХОВА

Л. П. Рихванов

Показана индикаторная роль естественных радиоактивных элементов для решения вопросов генезиса магматических и метасоматических пород, понимания процессов флюидогенного рудообразования. Приведены некоторые примеры.

Ключевые слова: радиоактивные элементы, индикаторы, магматические породы, онгониты, рудообразование, метасоматоз, минералообразование, скарны.

RADIOACTIVE ELEMENTS AS AN INDICATOR OF ROCKFORMING AND ORE FORMATION IN THE DEVELOPMENT OF F. N. SHAKHOV'S IDEAS

L. P. Rikhvanov

The article shows the indicator role of natural radioactive elements in dealing with the genesis of magmatic and metasomatic rocks, understanding the processes of fluid genetic ore formation. Some examples are given.

Keywords: radioactive element, indicator, magmatic rock, ongonite, ore formation, metasomatism, minerogenesis, skarn.

Ф. Н. Шахов высказал много плодотворных идей по вопросам магмо- и рудообразования. Достаточно вспомнить такие работы, как «Магматические породы Кузнецкого бассейна» (1927), «Происхождение белоречитов Алтая» (1940), «К теории контактовых месторождений» (1947), «Принципы систематики эндогенных рудных месторождений» (1962), «Геология жильных месторождений» (1964), «Магмы и руды» (1966) и др. Эти идеи получают свое развитие и в настоящее время, в том числе с использованием современных методов геохимических исследований, включая радиогеохимические, интенсивное развитие которых началось только во второй половине XX в. [15 и др.].

118 лет назад Анри Беккерель (Франция) открыл уникальное физическое явление – испускание солями урана невидимых лучей («урановые лучи»), названных позднее Марией Кюри-Склодовской радиоактивностью. Химические элементы – носители этого явления стали называться радиоактивными. За это Анри Беккерель и Мария и Пьер Кюри получили Нобелевскую премию в 1906 г.

Многочисленные исследования показали, что естественные радиоактивные элементы (ЕРЭ) встречаются во всем материальном мире в тех или иных количествах. Это позволило В. И. Вернадскому назвать их «всюдными». Более того, следует отметить, что существует **общая закономерность в соотношении тория и урана**, которую можно назвать законом Болтвуда – Резерфорда (они первые обратили внимание на этот факт, по-видимому, определяющийся законами мироздания). Отношения валовых содержаний тория к урану (Th/U) удивительно вы-

держанные начиная от Солнечной системы в целом (3,72) до ее планет и Луны (3,55), метеоритов (2,5–8,6), магматических образований (2,5–5,0, главным образом 3,5–4,5). Эта система отношений выдерживается во многих горных породах, за исключением пород хемо- и биогенного происхождения, а также продуктов метаморфизма и метасоматизма [6, 10 и др.].

Можно с уверенностью утверждать, что в настоящее время геохимия естественных радиоактивных элементов, прежде всего U и Th, а также продуктов их распада (Ra, Rn, U²³⁴ и др.) изучена наиболее хорошо, что обусловлено в первую очередь необходимостью поисков месторождений радиоактивного сырья для решения стратегических задач государства. И, конечно, этому способствовали и уникальные ядерно-физические свойства радиоактивных элементов (испускание γ -квантов, α - и β -частиц, спонтанное и индуцированное деление и др.), что позволило создать большое количество методов определения ЕРЭ на уровне ниже кларковых концентраций в любых природных объектах. В качестве примера можно привести метод запаздывающих нейтронов для U или нейтронно-активационный анализ для U и Th, методы гамма-спектрометрии как в лабораторных (камера низкого фона «КАНИФЕР» в ИГМ СО РАН), так и в полевых условиях, в том числе в многочисленных вариантах дистанционного определения. Уникальный метод осколочной (f) радиографии позволяет пространственно локализовать положение урана в структуре минерала, выявить характер его распределения в породах и установить особенности его перераспределения в процессе их преобразования или формирования каких-либо месторождений [13 и др.]. Косвенно этот метод позволяет решать вопрос о формах нахождения



урана и их эволюции, что принципиально при изучении процессов рудообразования [17 и др.].

Кроме того, установлено, что химические свойства (валентность, размер ионных радиусов, растворимость и др.) U^{+4} и Th^{+4} идентичны и близки к таковым для TR, 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, тогда в низкотемпературных флюидо-водных системах, в экзогенных условиях она становится иной в силу перехода U^{+4} в U^{+6} [1, 5 и др.]. Соответственно, показатель их отношения будет другим, что позволяет использовать его для целей типизации различных геологических процессов и их продуктов [11].

Подводя краткие итоги работ по установлению закономерностей поведения и накопления ЕРЭ в геологических процессах советскими и российскими геологами (В. И. Вернадский, А. П. Виноградов, Д. И. Щербатов, В. И. Баранов, В. И. Герасимовский, А. А. Смыслов, В. Е. Плющев, Г. Б. Наумов, В. М. Гавшин, Ф. П. Кренделев, А. С. Митропольский и мн. др.), а также зарубежными специалистами (Дж. Адамс, Р. Ларсен и др.), можно сделать следующий обобщающий вывод: *радиоактивные элементы можно использовать в качестве «меченых атомов» и с их помощью 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 нерадиоактивного сырья (благородные металлы, углеводороды и др.).*

При этом следует особо отметить: для данных целей следует оценивать не столько уровни накопления радиоактивных элементов (хотя это и немаловажно), сколько то, в какой степени изменяется (как правило, увеличивается) дисперсия в распределении триады ЕРЭ, как изменяются параметры корреляционных связей между ними и их отношений, формы их нахождения, прежде всего урана. Наши многолетние исследования по геохимии ЕРЭ подтверждают чрезвычайно важный фундаментальный теоретический и практический радиогеохимический вывод А. А. Смылова, Ф. П. Кренделева и др.: «в пределах однородного распределения ЕРЭ нельзя рассчитывать на обнаружение эндогенных концентраций нерадиоактивного рудного сырья» [8].

Это, по существу, является парадигмой радиогеохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых, и не только рудных. Роль индикатора играет и величина взаимосвязи радиоактивных элементов с другими рудными компонентами. Так, например, для гидротермальных месторождений зон тектономагматической

активизации Забайкалья (в понимании А. Д. Щеглова), по данным Ф. П. Кренделева и его коллег [2], характерна корреляционная связь ЕРЭ с Mo, Ag, Sb, Hg и некоторыми другими элементами, что подтверждается нашими исследованиями Алтае-Саянской складчатой зоны [11 и др.].

Радиогеохимические показатели можно успешно использовать для типизации гидротермально-метасоматических и рудных образований, как это было показано нами [11 и др.], а характер их изменения является достаточно надежным прогнозно-поисковым признаком флюидогенных месторождений (рис. 1).

Радиогеохимические данные, полученные нами [13] по скарновым месторождениям (контактовым, по Ф. Н. Шахову) подтверждают идеи Ф. Н. Шахова [18] о сложном генезисе месторождений такого типа (рис. 2).

Данные по уровню накопления, формам нахождения урана и значению Th/U отношения в минералах рудоформирующего процесса (пирит, карбонаты, флюорит и др.) могут быть критериями и для формационного анализа, и для решения вопросов генезиса [11–13 и др.].

Нами [14, 16 и др.] на примере разработки технологии прогнозирования месторождений углеводородов показано, что это работает на уровне не только эндогенных, но и экзогенных процессов.

Индикаторная роль ЕРЭ наиболее видна на примере анализа магматических комплексов. Чрезвычайно важный индикатор магматической природы гранитоподобных пород – отношение Th/U, которое для магматических пород составляет 2,5–5. Это отношение, на наш взгляд, является критерием магматической природы тех или иных типов пород интрузивно- или эффузивоподобного облика (например, онгонитов Монголии и онгонитов Алтая и т. д.). Так, онгониты (петротип дайковых пород) – это радиогеохимически специализированный комплекс по содержанию урана (5,7 г/т), близкий к таковому по содержанию тория (20,6 г/т) при Th/U = 3,6. По этим параметрам они соответствуют классическим магматогеенным образованиям. В то же время выделенные в качестве их аналогов дайковые образования («калгутиты») в Горном Алтае не могут рассматриваться как таковые, потому что имеют принципиально иные радиогеохимические показатели (Th/U < 1), что, скорее всего, отражает высокую степень их метасоматической переработки.

Радиоактивные элементы в магматических породах являются четкими индикаторами геодинамических обстановок их формирования и потенциальной рудоносности [4, 11, 15 и др.].

Наш опыт по изучению геохимии радиоактивных элементов в любых типах горных пород и почв позволяет однозначно утверждать, что полевые гамма-спектрометрические методы являются одними из самых эффективных для определения ЕРЭ [7, 11 и др.]. Выполненные нами работы в по-

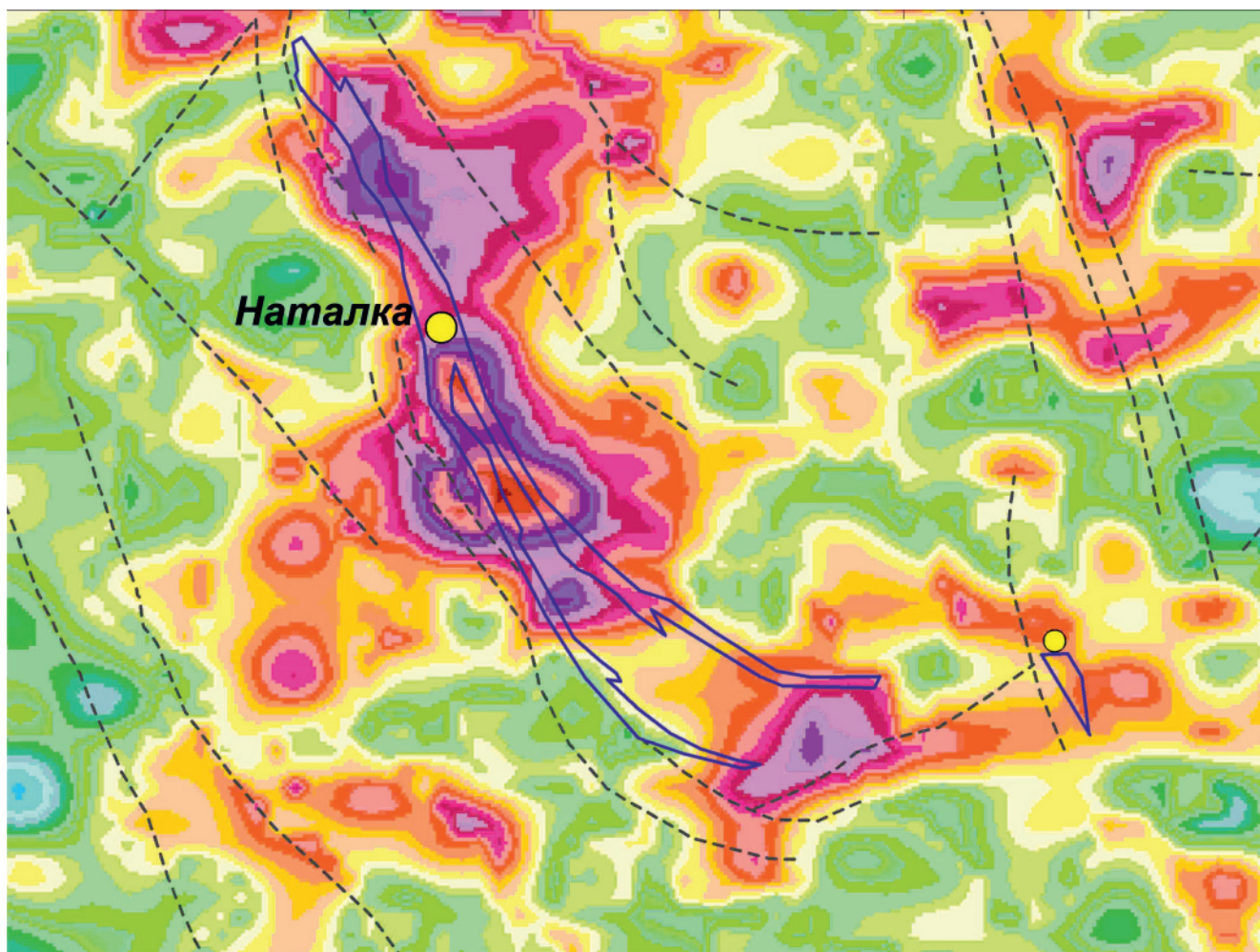


Рис. 1. Проявленность золоторудных объектов Наталкинского рудного поля в некоторых радиогеохимических показателях. Карта разности вторичных составляющих содержаний калия и тория по данным аэрогамма-спектрометрии [4]

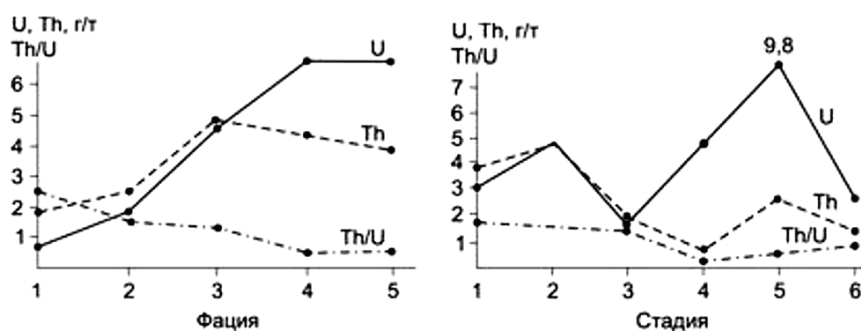


Рис. 2. Диаграммы изменения уровня накопления радиоактивных элементов в процессе формирования скарнов и скарновых месторождений а – по температурным фациям скарнов (1 – волластонит-плаггиоклазовой, 2 – пироксен-гранат-волластонитовой, 3 – пироксен-гранатовой, 4 – гранат-эпидотовой, 5 – пироксен-эпидотовой); б – по стадиям скарнообразующего процесса (по П. П. Пилипенко): стадии метасоматоза (1 – кремниевый, 2 – алюмосиликатного, 3 – галоидного, 4 – железного, 5 – флюидно-водного, 6 – сульфидного)

лях развития траппового магматизма позволили установить, что рудоносные интрузии норильско-талнахского типа отличаются достаточно четкими радиогеохимическими особенностями [9, 11], а базит-ультрабазитовые платиноносные комплексы кингашского типа (Восточный Саян) имеют ярко выраженную радиогеохимическую специфику

(устное сообщение И. С. Соболева). Базальтовый магматизм Кузбасса и Минусинского прогиба также характеризуется ярко выраженными радиогеохимическими признаками [11 и др.].

Радиогеохимические показатели могут и должны использоваться как индикаторы происхождения пород, генезис которых дискуссионен



в силу широко проявленных явлений конвергенции, например, метасоматитов типа белоречитов, детально описанных Ф. Н. Шаховым [19].

«Всюдность» радиоактивных элементов, их прекрасные ядерно-физические характеристики, наличие большого объема информации по общим геохимическим особенностям ЕРЭ в природных процессах, в том числе полученной учениками Ф. Н. Шахова (Ф. П. Кренделевым, А. С. Митропольским, В. М. Гавшиным, В. П. Ковалевым, В. А. Злобиным, Д. К. Осиповым, Р. С. Журавлевым, С. В. Мельгуновым и др.), – все это позволяет быть уверенным, что естественные радиоактивные элементы и их изотопы могут быть использованы как индикаторы для проверки многих идей, высказанных в свое время Феликсом Николаевичем Шаховым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вернадский, В. И.** Избранные сочинения. В 5 т. Т. 1. Очерки геохимии [Текст] / В. И. Вернадский. – М. : Изд-во АН СССР, 1954. – 696 с.
2. **Кренделев, Ф. П.** Применение гамма-спектрометрических методов для оконтуривания рудных зон в Забайкалье [Текст] / Ф. П. Кренделев, А. Г. Миронов, А. М. Гофман // Геология и геофизика. – 1976. – № 8. – С. 67–75.
3. **Лазарев, Ф. Д.** Естественные радиоактивные элементы – эффективный инструмент прогноза золоторудных объектов [Текст] / Ф. Д. Лазарев, В. В. Ромашко, П. В. Кирплук // Матер. IV Междунар. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск : ТПУ, 2013. – С. 321–324.
4. **Ножкин, А. Д.** Радиоактивные элементы в коллизионных и внутриплитных натрий-калиевых гранитоидах: уровни накопления, значение для металлогении [Текст] / А. Д. Ножкин, Л. П. Рихванов // Геохимия. – 2014. – № 9. – С. 1–20.
5. **Основные** черты геохимии урана [Текст] / Под ред. А. П. Виноградова. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 352 с.
6. **Радиоактивность** и радиоактивные элементы в среде обитания человека [Текст] / Л. П. Рихванов, С. И. Арбузов, Т. А. Архангельская [и др.] // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2006. – № 2(2). – С. 41–51.
7. **Радиогеохимические** исследования : Методические рекомендации [Текст] / Мингео СССР. – М., 1974. – 141 с.
8. **Радиогеохимические** ореолы в золоторудных полях Западного Узбекистана (по данным гамма-спектрометрии) [Текст] / Ф. П. Кренделев, А. М. Гофман, В. И. Климов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1976. – 53 с.
9. **Радиогеохимические** особенности вулканогенно-интрузивных комплексов Норильского рудного района [Текст] / Л. П. Рихванов [и др.] // Палеовулканизм Сибири (геодинамические, вулканотектонические структуры и металлогения) : тез. докл. III Регион. конф. – Томск : Изд-во ТГУ, 1991. – С. 116–118.
10. **Рихванов, Л. П.** Радиоактивные элементы в геосферных оболочках [Текст] / Л. П. Рихванов // Матер. II Междунар. конф. «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека». – Томск : ТПУ, 2004. – С. 498–505.
11. **Рихванов, Л. П.** Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований (на примере Алтае-Саянской складчатой области) [Текст] / Л. П. Рихванов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2002. – 536 с.
12. **Рихванов, Л. П.** Радиогеохимическая характеристика пирита золоторудных месторождений Алтае-Саянской складчатой области [Текст] / Л. П. Рихванов, А. Я. Пшеничкин, З. В. Малясова // Зап. ВМО. – 1983. – Ч. 112, вып. 1. – С. 57–66.
13. **Рихванов, Л. П.** Радиогеохимические особенности скарнов [Текст] / Л. П. Рихванов, С. И. Сарнаев, Т. Э. Безходарнова // Геохимия. – 1985. – № 3. – С. 300–313.
14. **Рихванов, Л. П.** Радиогеохимические методы поисков месторождений нефти и газа [Текст] / Л. П. Рихванов, И. С. Соболев, Н. Г. Лященко // Прикладная геохимия. – М. : ИМГРЭ, 2002. – С. 383–394.
15. **Смыслов, А. А.** Уран и торий в земной коре [Текст] / А. А. Смыслов. – Л. : Недра, 1974. – 231 с.
16. **Соболев, И. С.** Прогнозирование и поиски месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами [Текст] / И. С. Соболев, Л. П. Рихванов, Н. Г. Лященко // Геология нефти и газа. – 1999. – № 7–8. – С. 19–24.
17. **Таусон, Л. В.** Геохимия редких элементов в гранитоидах [Текст] / Л. В. Таусон. – М. : Изд-во АН СССР, 1961. – 285 с.
18. **Шахов, Ф. Н.** К теории контактовых месторождений [Текст] / Ф. Н. Шахов. – Новосибирск, 1947. – 96 с.
19. **Шахов, Ф. Н.** Происхождение белоречитов Алтая [Текст] / Ф. Н. Шахов // Тр. науч. конф. по изучению и освоению производительных сил Сибири. Т. 2. – Томск, 1940. – С. 25–42.