



## 7.2. ГЕОХИМИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

ГЕОХИМИЯ ЗОЛОТА  
В ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ

*С.М. Жмодик, Н.В. Рослякова*

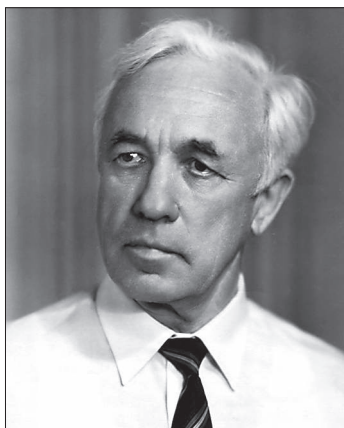
Ф.Н. Шахов много внимания уделял изучению геологии и геохимии золота и стимулировал работу сотрудников отдела по этой теме. Рассматривая основные направления научных исследований в золотоносных районах Сибири, Ф.Н. Шахов (1961) отмечал, что «геохимия золота во многом еще не ясна, ...даже кларки золота в земной коре точно не известны, ...установление содержаний золота в породах различного генезиса представляет большой научный интерес... Только геохимические исследования могут установить пути миграции золота (в т. ч. миграции золота, как круговороте его из осадков в магму и снова в осадки) и причины унаследованности золота рудными месторождениями» (цит. по: Шахов, 1994, с. 134–136).

Ф.Н. Шахов (1962) убедительно показал целесообразность систематики рудных месторождений на основе парагенетических ассоциаций рудных элементов. При таком подходе стала очевидной необходимость использования количественных данных о геохимических свойствах элементов, характеризующих их пространственную и генетическую связь с разными типами пород и руд, что побудило Ю.Г. Щербакова заняться данной проблемой. Первый вариант геохимической классификации элементов он опубликовал в 1965 г. и затем работал над ней до конца жизни (Щербаков, 1995; и др.).

Ф.Н. Шахов справедливо считал, что отсутствие «точных и чутких методов определения золота в породах и рудах» является главным препятствием в изучении геохимии золота в рудоформирующих системах. Нейтронно-активационный анализ с радиохимическим разделением проб, проведенный Г.И. Пережогиним в ГЕОХИ АН СССР, позволил выявить кларковые содержания золота в породах разного состава, существенно иные, чем представлялось ранее, и объяснить разные ассоциации элементов с золотом в ба-

зальтоидах, гранитоидах, глинистых сланцах и залегающих в них золотых рудах (Щербаков, Пережогин, 1964). Выявлению кларкового распределения золота в магматических породах, современных осадках Атлантического океана и морских водах были посвящены пионерные исследования 60-х годов Г.Н. Аношина и В.В. Потапьева (Аношин, Потапьев, 1966; Anoshin et al., 1969; Пещевицкий и др., 1971).

В своей геохимической лаборатории Ф.Н. Шахов создал аналитическое подразделение, способное ставить и разрабатывать новые прецизионные методики определения ультранизких содержаний золота — до 0,2 мг/т и менее (В.Г. Цимбалист, Р.Д. Мельникова). Основой же были тщательно, с глубоким геологи-



Д.г.-м.н. Ю.Г. Щербаков

ческим смыслом отобранные, всесторонне изученные образцы и пробы, неоднократный контроль результатов определений и т. п.

Благодаря хорошей воспроизводимости применяемых методов и низким пределам обнаружения золота, сопоставление их результатов по разным типам пород выявило новую тенденцию слабого, но закономерного повышения содержаний золота в магматических породах с увеличением их основности и магнезиальности, причем в эффузивных аналогах более, чем в плутонических (Щербаков, 1967). Первая информация о кларковой геохимии золота в сопоставлении с главными сопутствующими элементами по районам Кузнецкого Алатау, Горного Алтая и Чукотки позволила установить ряд основных закономерностей распределения благородного металла в главных типах пород и породообразующих минералах (Щербаков, 1967, 1974; и др.). Удалось четко выявить предполагаемую ранее рядом исследователей приуроченность золоторудных узлов, полей и золотоносных гранитоидов к комплексам вмещающих пород с относительно повышенным уровнем содержания благородного металла (Щербаков, Рослякова, 1972; Рослякова, Росляков, 1975; Петров, 1976; Злобин и др., 1977, 1979). Это было существенным аргументом в пользу возможности заимствования золота палингенными гранитоидами в момент их возникновения, но не исключало усвоения золота горячими растворами непосредственно из пород, в которых они циркулировали. По данным исследований Г.Н. Аношина в районах деятельности современных вулканов Камчатки, Ф.Н. Шахов (1969) сделал вывод о том, что горячие растворы в благоприятных условиях могут растворять и переотлагать золото, содержащееся в породах, что экспериментально подтвердил Г.Н. Аношин (1977). Руды, формирующиеся в разных средах, соответственно отличаются набором, содержаниями и соотношениями парагенных с золотом элементов (Shcherbakov, 1993). Ю.Г. Щербаков выделил аномалии по геохимическим типам ассоциаций элементов, т. е. по их сиаличности-фемичности, окси-гетерогенности и, главное, по уровню разбалансированности системы. Они определялись «методом ОК» (относительных коэффициентов), предложенным Ю.Г. Щербаковым, по направленности и степени отклонения от местного фона парных индикаторных отношений (Щербаков и др., 1980). Количественный анализ аномальных полей способствует прогнозной оценке типа оруденения, его фаціальности, пространственной позиции и возможных количественных характеристик, в том числе для золотоносных провинций Дальнего Востока, Сибири, Урала и Средней Азии, формирующихся в «черносланцевых комплексах верхнего докембрия» и палеозоя (Злобин, Вьюшкова, 1977; Злобин и др., 1979).

Изучение поведения золота в сложном процессе формирования руд было начато с распределения металла во всем разнообразии пород рудных полей: от неизмененных до руд. Исследования проводились на месторождениях, сформированных в разные металлогенические эпохи, в различных геолого-структурных условиях на территориях Кузнецкого Алатау, Забайкалья, Камчатки, Казахстана, Средней Азии и Монголии.

Впервые детально изучено распределение золота в рудных полях, возникших в процессе многоэтапного действия термофлюидной системы. Выявлена встречаемость золота как в исходных для формирования месторождений породах, так и в породах рудных полей, претерпевших многократное проявление гидротермального метаморфизма. В последних установлена высокая неравномерность в распределении благородного элемента (в нескольких порядках), в то время как в исходных породах содержания колеблются



практически в пределах одного порядка. Выявленные закономерности выразились в зональном расположении полос разной степени гидротермально измененных пород с повышенными и пониженными содержаниями золота относительно как месторождения в целом, так и отдельных рудных тел. Выделены ореолы трех порядков: 1) ореол рудного поля, 2) ореол месторождения и 3) ореолы рудных тел. Они различаются по своим масштабам, характеру распределения элементов, составу минералов-концентраторов золота и его корреляционным связям с другими элементами в зависимости от степени и кратности воздействия на породы термофлюидной системы. В 1970 г. Н.В. Рослякова защитила кандидатскую диссертацию на тему «Поведение золота в гидротермальном процессе образования Берикюльского золоторудного месторождения». В 1975 г. опубликована монография Н.В. Росляковой и Н.А. Рослякова «Эндогенные ореолы месторождений золота», в том же году переведенная на английский язык в Канаде.

Н.В. Росляковой впервые проведено изучение распределения золота в растворах флюидных включений в кварцах последовательных стадий минералообразования в рудных телах. Наиболее высокие содержания золота, наряду с наибольшей их дисперсией (от не обнаруживаемых использованным методом до 1 г/л), присущи растворам продуктивной стадии, к которой они возрастают по ходу процесса минералообразования. Флюидные включения, несущие 1 г/л и более Au, соответствуют началу осаждения главной массы золота в рудах. Результаты исследований докладывались на I Международном геохимическом конгрессе в Москве в 1971 г. (Щербаков и др., 1973, 1975; Рослякова и др., 1976, 1989, 1990).

Совокупность геохимических, минералогических и геологических данных позволила создать модель эндогенной рудоформирующей системы для месторождений золота. Показано, что месторождение образуется в несколько этапов функционирования термофлюидной системы, каждый из которых характеризуется перегруппировкой вещества — его растворением в различной степени и последующим отложением. Этим создаются зоны выноса и накопления золота сначала в породах, а затем и в самих постепенно развивающихся в них рудных телах. В зону рудообразования растворы могут поступать без Au, обогащаясь им за счет вмещающего субстрата. Максимальные концентрации Au возникают в участках проявления наибольшего числа его перераспределений. Возрастает содержание золота в рудообразующих растворах и минералах в ходе образования рудного тела до продуктивной стадии включительно. Это проливает свет на известную приуроченность столбового обогащения к участкам наибольшего проявления внутриминерализационных подвижек (Рослякова и др., 1971; Щербаков, Рослякова, 1981, 1987; и др.).

Ф.Н. Шахов уделял пристальное внимание проблемам образования рудных столбов. Под его руководством в институте в 1969 г. прошел Всесоюзный симпозиум «Проблемы образования рудных столбов». В решении симпозиума подчеркнуто, что изучение причин неравномерности распределения минерального вещества на площадях развития гидротермального процесса является одной из наиболее важных задач в ближайшее время. Материалы симпозиума были опубликованы и привлекли большое внимание геологов-рудников.

В качестве дополнительных критериев изучено распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) при формировании золоторудных месторождений юга Сибири, Средней Азии и Монголии. Установлено, что при гидротермальном метаморфизме пород, вмещающих золоторудные месторождения, идет

перегруппировка РЗЭ, изначально содержащихся в породах, параллельно с перераспределением Au и других компонентов. С усилением изменения пород по ходу процесса содержания РЗЭ понижаются. При этом метасоматиты преимущественно кварцевого состава наиболее обедняются ими, а в интенсивно серицитизированных, карбонатизированных разностях идет локальное накопление. Часть РЗЭ переходит в руды, где достигается наибольшая степень их фракционирования. Кривые распределения РЗЭ здесь резко отличаются от вмещающих пород и непромышленных участков рудных тел (Рослякова и др., 1992, 1997).

Проведенные исследования позволили выделить геохимические критерии поисков и прогноза золотого оруденения разного иерархического уровня. Чем выше дисперсия в содержаниях элементов, прежде всего золота, и чем шире площадь подвергнутых гидротермальному метаморфизму пород, при прочих равных условиях, тем крупнее месторождение они включают. Чем контрастнее зоны (ореолы) аномально повышенных и аномально пониженных содержаний золота во вмещающих породах, тем богаче заключенная в них руда. Устойчивость по вертикали геохимических, минералогических и геолого-структурных параметров оруденения является благоприятным условием его протяженности на глубину.

Кривые распределения РЗЭ можно использовать в качестве критерия оценки золотоносности исследуемого пункта минерализации. Составленная в 1968 г. аксонометрическая проекция (блок-диаграмма) главного участка Синохинского золоторудного поля Горного Алтая в скарнах по имеющимся на руднике листам подземной документации, позволила уточнить структуру участка, выявить склонение рудных столбов, подтвердить их продолжение специально заданными скважинами и, с учетом работ Ф.Б. Бакшта и М.И. Сязиной, продлить на долгие годы жизнь рудника, а месторождение из разряда мелких перевести в ранг среднего по масштабам (Щербаков, Рослякова, 1972). В 70-х годах с учетом наших данных была заложена глубокая шахта на Бериккульском месторождении, а Гавриловское месторождение в Кузнецком Алатау оценено как комплексное. Ю.Г. Щербаков и Н.В. Рослякова совместно с Д.И. Портянниковым и др. сначала сделали прогноз, а затем и установили в Салаирском рудном поле, где шестьдесят лет до того отрабатывалось полиметаллическое месторождение кембрийского возраста, собственно золоторудное пермское промышленное оруденение, наложенное на полиметаллическое и выходящее далеко за его пределы. Высокая прогнозная оценка его запасов по золоту в значительной степени подтверждена разведкой. Была дана положительная оценка Федоровского месторождения в Горной Шории. (Щербаков и др., 1983, 1990, 2003; Рослякова и др., 1983; Росляков и др., 2008).

Сотрудники отдела, в течение семи лет проводившие исследования в Монгольской Народной Республике, впервые для этой страны составили на геолого-геохимической основе металлогеническую карту по золоту, которая на ВДНХ удостоена бронзовой медали (Щербаков и др., 1986). Это позволило сделать принципиальную переоценку золоторудного поля Боро в северо-западном Хэнтее. Ранее оно было забраковано германской экспедицией, проводившей там многолетнюю разведку издавна известных кварцево-золоторудных жил. Прогнозные запасы оказались в десятки раз более высокими за счет выявленного штокверка. Месторождение ныне успешно эксплуатируется. На основе изученной закономерности распределения золота в зеленосланцевых толщах хребта Хан-Хуэй предложена модель полиэтапного концентрирования благородного металла за счет его экстрагирования из



вещающих толщ. Наиболее перспективными на золотое оруденение являются породы биотит-хлоритовой субфации метаморфизма, что Ю.А. Калининым (1986, 1989) рекомендовано использовать в локальном прогнозировании. Геохимические изыскания позволили выявить золото-серебряное оруденение в Восточно-Монгольском флюоритовом поясе, имеющем много общего с рудами Восточно-Забайкальской флюоритовой провинции (Росляков, Калинин, 1988).

## ГЕОХИМИЯ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ГРАНИТОИДНЫХ РУДОФОРМИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

---

*И.Н. Маликова*

Изучению связи гранито- и рудообразования Ф.Н. Шахов придавал большое значение, что нашло отражение в серии его работ, приведенных в книге «Магмы и руды» (1994). Он писал: «нужно считать, что проблемы происхождения гранитов не существует — они образуются из магмы. Но есть проблема рождения гранитных магм. Решить ее — значит привести в ясность весь вопрос» (Шахов, 1956), и далее: «...гранитные расплавы могут возникать и на сравнительно небольших глубинах. Источник же эманаций, способствующий образованию расплава, может быть различным. Им не обязательно должна быть рожденная на глубине гранитная магма». Это в полной мере подтверждено современными данными и выделением различных типов гранитов (S, I, A, M) (Махлаев, 1972, 1987; Chappel, White, 1974, 2001; Kingetal, 2001).

В предисловии к сборнику «Гранитоидные массивы Сибири и оруденение» (1971) Ф.Н. Шахов писал: «В большинстве случаев генетическая и пространственная связь с гранитами руд олова, вольфрама, тантала и ниобия считается доказанной и несомненной. Но, к сожалению, даже это оруденение не всегда и далеко не во всех массивах обнаруживается, оно не вытекает как необходимость из процесса формирования плутонов. По-видимому, возникновению и концентрации рудного вещества должны благоприятствовать сложные обстоятельства» (с. 3). Это высказывание служило программным направлением при выполнении исследований по редкометальной проблеме.

Изучение геохимии редких элементов в гранитах проводилось в свете гипотезы Ф.Н. Шахова о палингенном коровом образовании очагов гранитоидных магм, пульсационной кристаллизации и рудоформирующей роли гранитов разных фаз. В исследованиях принимали участие в качестве основных исполнителей В.В. Потапьев, Я.А. Косалс, И.Н. Маликова, соисполнителей — А.Н. Дмитриева, Ю.И. Маликов, С.И. Ковалев. Результаты исследований опубликованы в ряде монографий (Косалс, 1971, 1976, 1983; Потапьев, Маликова, 1974) и статей (Косалс, 1962, 1968; Косалс, Дмитриева, 1972, 1973; Косалс, Маликова, 1991; Потапьев, 1965, 1971; Потапьев, Маликова, 1967, 1974; Маликова и др., 1972, 1977, 1989, 1991; и др.). Основные выводы могут быть сформулированы в следующем виде.

1. Подсчет баланса вещества по главным петрогенным элементам, микроэлементам и летучим во вмещающих породах, породах контактового ореола и гранитоидах на примере Каркаралинского плутона показал, что плавление вулканогенно-осадочных толщ на раннем этапе проходило в условиях привноса K и F, а на поздних — K (Na), F, Si и сопровождалось выносом Ti, Fe, Mg, Ca, Ni, V, Cr, Zn, уменьшением содержаний B и Cl. Количества Sn, Be, Ta, Zr, U, Pb возросли или остались на уровне содержаний во вмещающих породах. Установлено унаследование большинства микроэлементов в породах группы гранодиорита и зависимость содержаний в биотитовых и аляскитовых гранитах от состава замещаемых пород. Гранитоиды фемической зоны отличаются повышенными концентрациями Ti, Fe, Mg, Ca, Na, Cr, Co, Ni, Sr и более низкими — Zr, Ta, Nb, Li, Rb, по сравнению с кларковыми.

2. На примере гранитоидных массивов Горного Алтая и Забайкалья установлено, что они сформировались в процессе пульсационной кристаллизации расплава при прерывистом отделении летучих. Рудная минерализация связана с разными фазами кристаллизации, в том числе редкометалльная — с поздними. В Кольванском массиве с гранитами 1-й фазы генетически связана сульфидная минерализация, с гранитами 2-й фазы — молибденово-вольфрамовая, с 3-й фазой — вольфрамово-бериллиевая, с 4-й фазой — тантало-ниобиевая. В Хангилай-Шилинском массиве оловянные и вольфрамово-оловянные рудопроявления связаны с гранитами 1-й фазы, вольфрамовые — с гранитами 2-й фазы, вольфрамово-бериллиевые — с апофизами гранитов 3-й фазы, тантало-ниобиевая минерализация связана с 4-й фазой кристаллизации. В Булуктаевском массиве первый этап минерализации представлен вкрапленностью пирита, молибденовая минерализация связана с инъекциями даек гранит-порфиров 2-й фазы, редкометалльно-вольфрамовая — отделена инъекциями 3-й фазы кристаллизации. Пульсационная кристаллизация расплава сопровождалась многократным отделением летучих со сложной эволюцией состава растворов. В Первомайском массиве выделено шесть фаз кристаллизации гранитов и связанных с ними этапов рудообразования, главными из которых являются молибденовый, молибденово-редкометалльный, редкометалльно-вольфрамовый и вольфрамовый. Пульсационный характер кристаллизации гранитной магмы был доказан на примере и многих других массивов.

Выявлено, что потенциально рудоносными являются гипабиссальные гранитные массивы с высоким содержанием F. Распределение редких элементов (Li, Rb, Tl, Be, Pb, Zr, Sn, Mo, W, Ta, Nb) в гранитах разных фаз таких массивов характеризуется уменьшением содержаний Mo, Be, W, Rb и др. в гранитоидах поздних фаз, выносом B и F, увеличением содержаний Ta и Nb и ореолами гидротермально измененных пород с повышенными содержаниями Li, Cs, Be, Mo, W, V, F и др. К этим ореолам нередко приурочены рудные тела и месторождения. В общем виде устанавливается следующая последовательность выноса редких элементов из расплавов: Mo–W–Sn–Be–Nb, Ta, Zr, TR, что соответствует выделению летучих соединений и их устойчивости. В гранитах с низким уровнем содержания F преобладает кристаллохимическое рассеяние редких элементов. Эманационный перенос и остаточное концентрирование проявлены слабо, что объясняет низкую потенциальную рудоносность.

3. Выявлены геохимические признаки редкометалльного оруденения в гранитоидах. Биотитовые граниты массивов с Ta-оруденением по содержанию Ta не отличаются от безрудных, но различаются по содержанию Ta и Nb



в биотите, который является их минералом-концентратором. Содержание Ta в нем увеличивается в среднем в 2 раза, а Ta/Nb-отношение — на порядок. Поисковый признак на Ta-оруденение — повышенные содержания Ta в касситеритах и вольфрамитах: Ta/Nb-отношение увеличивается на этапе собственно Ta-оруденения. В Джидинском рудном районе доказано отсутствие повышенных содержаний Mo и W в рудоносных гранитных массивах по сравнению с нерудоносными. Обогащение в 2–4 раза Mo и W намечается лишь локально в апофизах и апикальных частях куполов. Характерно резкое возрастание дисперсии (в 5–20 раз) этих элементов в рудоносных массивах и их отдельных фазах по сравнению с безрудными. На примере редкометалльно-молибден-вольфрамоносных гранитов Калгутинского массива установлено отличие от безрудных биотитовых и лейкократовых гранитов, выраженное высокой степенью кристаллизационной и эманационной дифференциациями по K/Rb-индексу и редкометалльному индексу  $F(\text{Li} + \text{Rb})/(\text{Ba} + \text{Sr})$ . На тройной диаграмме  $F-(\text{Li} + \text{Rb})-(\text{Ba} + \text{Sr})$  граниты всех фаз кристаллизации массива попадают в поле рудоносных. Коэффициенты накопления редких элементов на магматическом этапе превышают единицу: W (5,8), Li (2,9), B (2,2), Be (2,0), Rb (2,0), Cs (1,2), Mo (1,1). Суммарное содержание TR и тяжелых лантаноидов уменьшается в прямой зависимости от содержаний Th, Hf, P. Редкометалльные гранитоидные массивы отличаются соотношением V, Ti и Mn в магнетитах (по результатам микронзондирования), которое смещается в пользу Mn. Выявлены геолого-геохимические признаки прогнозной оценки танталоносных амазонитовых апогранитов.

4. Геохимические данные позволили использовать их для разделения магматических комплексов и формаций, которые не всегда различаются по петрохимическим характеристикам. Для разделения гранитоидных комплексов Восточной Тувы (Таннуольского, Бреньского и Улуг-Танзекского) использованы геохимические соотношения Rb–Sr, Rb–K/Rb, Rb–Ba/Rb, Li–Mg/Li, F/B, Ba–Ba/Sr и др. и корреляционные связи между редкими элементами. По геохимическим критериям разделены формация редкометалльно-фтористых щелочных гранитов и литий-фтористые граниты гранит-лейкогранит-алаякитовой формации ( $K/\text{Rb}-F$ ,  $K/\text{Rb}-\text{Nb}/\text{Ta}$ ). Горноалтайский и калбинский типы редкометалльных гранитов выделены в самостоятельные гранит-лейкогранитную и гнейсо-гранодиорит-гранит-лейкогранитную формации с окислительным и восстановительным флюидными режимами соответственно. Их различия отражаются на значениях редкометалльного индекса: в ранних фазах молибден-вольфрамоносных горноалтайских гранитов его значения в 2 раза ниже, чем в гранитах калбинского типа с вольфрам-олово-танталовым оруденением, а в поздних дифференциатах они возрастают в 20 и 100 раз соответственно.

Геохимическая характеристика пегматитоносных и редкометалльных гранитоидов Забайкалья дана на примере борщевочного и кукульбейского комплексов. Ранние продукты дифференциации (биотитовые и двуслюдяные граниты) по своим петрохимическим особенностям не различаются. Установлены отличия лейкократовых и алаякитовых гранитов по дискриминантным функциям. Критериями разделения пегматитоносных и редкометалльных гранитоидов служат коэффициенты распределения F и редких элементов между фазами кристаллизации. Разделение этих комплексов достигается также использованием геохимических индикаторов — соотношений:  $\text{Rb}-\text{K}/\text{Rb}$ ,  $\text{Li}-\text{Na}/\text{Li}$ ,  $\text{Ta}-\text{Nb}/\text{Ta}$ ,  $\text{Li}-\text{F}/\text{Li}$ ,  $\text{W}-\text{Sn}/\text{W}$ ,  $\text{Be}-(\text{Si} + \text{Al} + \text{Na} + \text{K}/\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca})$ ,  $(\text{Li} + \text{Rb})-(\text{Si} + \text{Al} + \text{Na} + \text{K}/\text{Fe} + \text{Mg} + \text{Ca})$  и др. Выявлена зависи-

мость между потенциальной рудоносностью, индикаторными отношениями и температурой гомогенизации расплавных включений.

5. По данным изучения газово-жидких включений в минералах последовательных стадий минералообразования установлены особенности температурных условий скарнового и гидротермального этапов формирования редкометалльного оруденения, связанного с разными фазами кристаллизации гранитоидов.

Работы лаборатории по гранитоидной тематике проводились параллельно с исследованиями в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск) под руководством Л.В. Таусона. Следует сказать, что деловые и личные отношения Феликса Николаевича и Льва Владимировича были очень дружескими, что благоприятно отразилось и на взаимоотношениях между сотрудниками Института геохимии и лаборатории.

Основной целью обоих коллективов являлось изучение процесса формирования гранитоидов и их рудоносности, главным образом на примере гранитоидных массивов Сибири. Несмотря на близость методов и подходов, использовавшихся при исследовании геохимических особенностей гранитоидов в обеих организациях, в то же время были и существенные различия. Так, применение подхода, использующего расчет баланса элементов, в Новосибирске в целом позволило доказать палингенную природу определенного типа гранитоидов (S-граниты) и формирование оруденения во фронтальных частях перемещающегося гранитного расплава, в куполах крупных гранитных массивов. Расчет баланса вещества при формировании Каркалинского плутона показал, что для палингенного образования гранитоидных магм необходим глубинный привнос K, Si, F и вынос Ti, Fe, Mg и Ca. Привнос и вынос минимальны на этапе образования гранодиоритов, и в этом случае установлено прямое унаследование микроэлементов из вмещающих пород. Для биотитовых и аляскитовых гранитов такого унаследования не отмечено, за исключением Zr и, возможно, Ta. Из-за накопления в очагах магмообразования редких элементов и выноса в контактовые ореолы Co, Ni, V, Cr, Zn и других элементов зависимость их концентраций от состава исходных пород утрачивается или проявляется в угнетенной форме, несмотря на достаточно большую глубину эрозионного среза.

Другой подход предполагал исследование геохимии отдельных элементов (Be, Ta, Nb, Li и др.) в магматическом, гидротермальном и экзогенном процессах с применением широкого круга аналитических подходов, методов и приемов, в том числе оригинальных, на основе детального изучения геологии. В этом направлении был сделан хороший задел и получены новые результаты, в частности о решающей роли фтора в транспорте и формировании руд редких элементов, а также высокой подвижности и перераспределении редких элементов (в частности Ta и Nb) в низкотемпературных гидротермальных и экзогенных условиях. На этих основах были разработаны поисковые критерии редкометалльного оруденения.

К сожалению, ранний уход из жизни Ф.Н. Шахова и переход вслед за этим главных исполнителей в другие организации не позволил довести начатые исследования до логического завершения — открытия крупных месторождений, хотя потребность в разработках сотрудников лаборатории со стороны производственных организаций была велика, о чем свидетельствуют многочисленные отчеты, написанные на основании исследований, выполненных по специальным договорам. Ссылки на работы, проведенные сотрудниками лаборатории более 20 лет назад, можно встретить практически во всех публикуемых изданиях, касающихся редкометалльной тематики в геохимии.





Несомненно, более крупный коллектив Института геохимии под руководством Л.В. Таусона провел большой объем исследований, что позволило его сотрудникам и ученикам (В.И. Коваленко, М.И. Кузьмину, Ю.П. Трошину, В.Д. Козлову, В.С. Антипину и др.) провести геохимическую типизацию гранитоидов, выделить потенциально рудоносные типы и выявить ведущие факторы, которые ее определяют, изучить геохимические особенности плюмазитовых и агапитовых рекометалльных гранитов МНР и обнаружить новый вид редкометалльных гранитов — онгониты или литий-фтористые граниты. Следует признать, что этот коллектив занял лидирующее положение в исследованиях по редкометалльному направлению не только у нас в стране.

Несмотря на то что сотрудники лаборатории геохимии одними из первых начали применять методы термобарогеохимии с целью определения физико-химических условий формирования редкометалльного оруденения, эти работы также позднее были приостановлены, но явились положительным примером и получили дальнейшее развитие на более высоком уровне в Геологическом институте СО РАН, где этими исследованиями занимался Ф.Г. Рейф. Им даны  $P$ – $T$ -оценки расплавов, их водонасыщенности, степени отклонения от эвтектики и открытости системы на основе геолого-петрографических исследований и методов термобарометрии расплавных включений.

## ГЕОХИМИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (РАЭ) В МАГМАТИЧЕСКИХ, МЕТАМОРФИЧЕСКИХ И ОСАДОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

---

*В.П. Ковалёв, А.Д. Ножкин*

Организация радиогеохимического направления в лаборатории при- шлась на те годы, когда в стране успешно создавалась собственная рудная база урана. Ф.Н. Шахов пригласил на исследовательскую работу и в аспирантуру геологов, зарекомендовавших себя в деле поисков и разведки месторождений урана в Алтае-Саянской складчатой области: А.С. Митропольского, В.Г. Чернова, В.П. Ковалёва, В.М. Гавшина. Цель исследовательских работ формулировалась просто — сконцентрировать и проанализировать всю доступную информацию, обеспечивающую прогноз руд редких и радиоактивных элементов, и обосновать эндогенную и экзогенную историю перераспределения рудообразующего вещества на территории Западной и Средней Сибири. К 1963 г. были образованы эндогенная и экзогенная научно-исследовательские лаборатории под руководством А.С. Митропольского и Ф.П. Кренделева. У эндогенщиков (В.П. Ковалёв, В.Г. Чернов, Д.К. Осипов, Р.С. Журавлёв, С.В. Мельгунов) минералогическую ячейку возглавила Н.А. Кулик, а химико-аналитическую группу — З.В. Гладких-Малясова. У экзогенщиков (В.М. Гавшин, А.Д. Ножкин, В.А. Злобин, А.Г. Миронов, Г.Г. Шалмина) методами спектрометрии занимался В.А. Бобров, а радиохимии — Р.Д. Мельникова. Строгое разделение тематики все же было невозможно — в конкретных районах исследовались объекты и эндогенного, и экзогенного генезиса.

Эффективный прогноз предполагает знание эпох и типов промышленного оруденения, определяющих характеристик минеральных парагенезисов, параметров радиогеохимического фона рудоформирующих и рудовмещающих породных ассоциаций и комплексов. Понятно, что этими сведениями сотрудники отдела геохимии не располагали в полной мере. Поэтому Ф.Н. Шахов организовал издание двух сборников переводных статей по геологии урановых и редкометалльных месторождений (1960, 1962). Статьи для перевода он подбирал сам, переводчиками были Г.Н. Аношин, В.П. Ковалёв, В.В. Потапьев, Н.А. Росляков, Н.В. Рослякова, В.Г. Чернов и другие сотрудники института.



А.С. Митропольский

Научные исследования сначала ориентировались на регистрацию открытых в регионе проявлений урановой и ториевой минерализации и на их типизацию в качестве аналогов ранее выявленных зарубежных месторождений. К этому времени становилось ясно (на мировом материале), что эндогенное урановое оруденение не образует главных запасов необходимого сырья. Основные ресурсы урана в мире (около 80 %) связаны с геохимическими барьерами, возникающими в составе осадочных образований. Месторождения урана в осадочных породах формировались во все геологические эпохи: от докембрия до четвертичного времени (конгломераты Витватерсранда, Южная Африка), месторождения типа «несогласия» (Австралия, Канада), месторождения в погребенных долинах рек (Франсвильский район, Габон; плато Колорадо, США; южная окраина осадочного чехла Западно-Сибирского бассейна). Постепенно выяснилось, что урановое оруденение многолико и его стандартная типизация затруднительна.

В СССР был отмечен ряд собственных типов рудных концентраций. До 1965 г. лаборатория А.С. Митропольского занималась обобщением материалов по установленным урановым проявлениям Алтае-Саянской складчатой области – Таштузек, Тонгош, Каракол, Базас, Лабыш, Солонешное, Карасук и др. Шли исследования рудных парагенезисов и выяснение условий их образования. По итогам более чем пятилетних работ была осуществлена предварительная оценка довольно скромной ураноносности региона и высказаны некоторые соображения по его прогнозам. Лаборатория Ф.П. Кренделева занималась исследованием урановых рудопроявлений Енисейского кряжа (Тейское, Северо-Тейское, Кедровое, Вороговское, уран-ториевых с редкими землями проявлений Нойбинской зоны), метавулканогенно-терригенных грубообломочных и черносланцевых образований этого региона, а также отложений Минусы с растительным детритом (Приморское).

Для сведения укажем, что все мировые запасы урана к 1990 г. составляли около 5,3 млн т, из них более 2 млн т – в СССР. После распада СССР в России осталось только 30 % общего ресурса урана (Восточная Сибирь). Основные (до 60 %) запасы руд гидрогенного типа находятся в Средней Азии и Казахстане.



Обед в маршруте. Слева направо: Н.А. Кулик, ..., В.Г. Чернов, А.С. Митропольский, С.В. Мельгунов

С 1965 г. обе лаборатории были нацелены на регионально-геохимические исследования. В задачу этих работ входило: определение уровней содержания, характера распределения и соотношения радиоактивных элементов в разнообразных по составу, условиям и времени образования геологических формациях, изучение поведения их в различных геологических процессах — осадочных, магматических, метаморфических, выявление геохимически специализированных потенциально рудоносных комплексов, выступающих в качестве источника урана и тория в месторождениях, а также изучение геохимических условий формирования рудных концентраций. Основная цель этих исследований — определение степени геохимической дифференцированности минерального вещества, мантийно-коровой его неоднородности как одной из важных причин геохимической зональности и образования рудных месторождений в металлогенических провинциях, особенно редкометалльного профиля (U, Th, Li, Be, Sn, Ta, РЗЭ и др.).

Д.К. Осипов и Р.С. Журавлёв изучали интрузивы Рудного и Горного Алтая, Кузнецкого Алатау; В.П. Ковалёв — вулcano-плутоногенные ассоциации Минусы и Предсаянья; А.С. Митропольский и С.В. Мельгунов — кембрийские, ордовик-силурийские и девонские осадки и гранитоиды Горного Алтая и Западного Саяна; Ф.П. Кренделев и А.Д. Ножкин — докембрийские толщи Енисейского кряжа; В.М. Гавшин — осадочный девонско-каменноугольный чехол Минусы. Все большее место в трудах лабораторий стали занимать исследования процессов перераспределения урана и тория. А.С. Митропольский, С.В. Мельгунов, В.П. Ковалёв, А.Д. Ножкин и А.Г. Миронов нашли подтверждение заметных перераспределений кларковых содержаний урана в лавах и туфах, претерпевающих площадные гидротермальные изменения. Коры выветривания исследовали Ф.П. Кренделев, А.М. Гофман и Г.Г. Шалмина, позднее С.М. Жмодик. А.О. Пяллинг изучал эффекты хемосорбции на природных и искусственных слоистых силикатах. В это время активно идет поиск источников урана, ставятся серии опытов по выщелачиванию урана из пород с его высокими кларками. В 1969 г. В.П. Ковалёв и З.В. Малясова про-

водят массовое сопоставление выщелачиваемости урана из салических плутолитов и вулканитов Предаянья и выявляют резкие различия между ними. Из сиенитов и гранитов извлекалось до 80 % валового содержания, а из лав — максимум 5 %. При этом подавляющая часть урана в интрузивных породах была заключена в аксессуарных минералах интерстиций, а в эффузивных породах — равномерно распределена в мезостазисе. Главная причина установленного контраста в мобилизации урана растворами из одинаково растертых в пудру порошков алюмосиликатного состава стала выясняться только после переплавки гранитоидов в стекла. Приготовленная из них пудра уже не отдавала в раствор даже 0,1 % урана. Поиск механизма, пресекающего диффузию урана в слабокислые и слабощелочные растворы, привел к давним работам И.В. Гребенщикова (1940) по образованию при гидролизе силикатных стекол кремнегелевых (толщиной до 50 нм) «рубашек», запирающих диффузию ионов. Слабая кремневая кислота уже при низких концентрациях в водном растворе полимеризуется с образованием студней. Позже это открытие подтвердили радиогеохимики в США: Р.А. Зелински (1979), А.В. Уолтон, В.Е. Гелловей, К.Д. Генри (1981). Этот феномен послужил исходным доводом в пользу создания стекловатых и керамических матриц для консервации радиоизотопов, генерируемых в ядерном цикле.

Ф.П. Кренделевым с сотрудниками разрабатывалась тема «Исследование условий образования древних металлоносных конгломератов», изучался ряд месторождений и рудопроявлений урана, связанных с поверхностями несогласия. Исследования рудоносности метаосадочных и особенно грубообломочных отложений разных стратиграфических уровней протерозоя в связи с проблемой уран-золотоносных конгломератов привели к обнаружению в пределах известных тогда урановорудных объектов в толщах Енисейского кряжа (Тейское, Кедровое, Оленье месторождения, Кутукасское, Полярное и другие рудопроявления) повышенной золотоносности, экономическая значимость которой в последующем была подтверждена бурением (Кренделев и др., 1973; Ножкин, Гавриленко, 1976).

В 1971 г. под впечатлением от прошедшего в Москве Международного геохимического конгресса Ф.Н. Шахов предложил Президиуму Сибирского отделения АН СССР провести в Новосибирском научном центре Первое все-союзное радиогеохимическое совещание. К тому времени в наших лабораториях появились циклы статей с нетривиальными наработками, относящимися к проблеме прогноза уранового и ураново-редкометалльного оруденения. Ф.П. Кренделев опубликовал монографию «Кларки естественных РАЭ в породах докембрия Енисейского кряжа» (1971), в которой показал обогащение ураном и торием пород оснований древних кор выветривания. Это послужило импульсом постановки проблемы нахождения условий образования древних металлоносных конгломератов. В 1970 г. А.С. Митропольский с сотрудниками издал книгу «Уран и торий в магматических и метаморфических породах центральной части Алтае-Саянской складчатой области». В ней были раскрыты разные уровни содержаний РАЭ в мантийных и коровых магматитах и доказано, что большинство палеозойских осадков этого региона принадлежит к продуктам размыва и переотложения пород основного и среднего состава.

Внезапная кончина Ф.Н. Шахова не отменила созыва совещания в Новосибирске. Оно прошло под руководством А.И. Тугаринова (ГЕОХИ АН СССР). Геохимики отдела В.А. Бобров, В.М. Гавшин, А.Д. Ножкин, В.П. Ковалёв, Ф.П. Кренделев, С.В. Мельгунов, А.Г. Миронов, А.С. Митропольский,



А.О. Пялиниг, В.П. Раевский вынесли на обсуждение наиболее значимые результаты исследований:

– впервые на большом аналитическом материале выявлены уровни содержания и особенности распределения трех радиоактивных элементов – U, Th, K в метаосадочных сериях раннего и позднего протерозоя, в разных по составу вулканических ассоциациях и разновозрастных гранитоидах Енисейского кряжа, Горного Алтая, Западного Саяна и складчатых областей Западной Сибири;

– дана сравнительная характеристика поведения урана и тория в процессах вулканического и plutонического магматизма. Сравнение гетероморфных аналогов (особенно коровой природы) показало, что при равных содержаниях тория их отличают разные торий-урановые отношения – в среднем 2,5 и 5,0. Это означает, что эффузивы вдвое богаче ураном, чем их интрузивные эквиваленты (в процессе кристаллизации расплавы теряют половину урана, который активно выносится летучими); изучены сорбенты урана в осадочных породах. При быстром же охлаждении лав покидающие их флюиды не успевают выносить рассеянный в расплаве уран, и он прочно захватывается матрицей.

Приведенные результаты показали, что трактовка А.И. Тугариновым интрузий как «могил урана» неверна. Уран выносится из кристаллизующихся магм и отрывается далеко от своего источника. Граниты вновь поставляют оставшийся уран в воды зоны активного водообмена после их поднятия на поверхность.

Смотр научных сил радиогеохимиков страны убедил участников совещания в их способности создать первый макет радиогеохимической карты Союза ССР. Руководство работой было поручено А.А. Смыслову (ВСЕГЕИ). Геохимики отдела стали соавторами карты по Западно-Сибирскому сегменту Азии. В ряду установленных уровней ураноносности геоблоков эта площадь стоит по перспективам наращивания запасов на втором и третьем местах.



Д.г.-м.н. А.Г. Миронов, бывший аспирант лаборатории, затем директор Геологического института СО РАН в Улан-Удэ

Особое внимание сотрудники лабораторий уделяли выяснению поведения урана и тория при региональном и гидротермальном метаморфизме. Исследуя метаморфизм эффузивных пород, В.П. Ковалёв, А.Г. Миронов и А.Д. Ножкин показали, что при слабом метаморфизме имеют место переотложение и сегрегация урана без его выноса. В зеленокаменных (празинитовых) ортосланцах зон динамометаморфизма происходит даже улавливание движущегося урана, которое связано с сорбцией на развивающихся здесь слоистых алюмосиликатах, а также на гидроксидах титана и железа (Миронов, Ножкин, 1978; Ковалёв, 1980). С.В. Мельгунов в кандидатской диссертации на примере исследования зонального метаморфического комплекса Южно-Чуйского хребта выявил отчетливую тенденцию к уменьшению содержаний урана в породах с увеличением степени метаморфизма. По

данным А.С. Митропольского, С.В. Мельгунова и В.Г. Чернова (1972), породы в заметном количестве начинают терять уран в биотитовой зоне зеленосланцевого метаморфизма. Как показали исследования А.Д. Ножкина с Е.М. Крестинным (1984) и О.М. Туркиной (1993), наиболее эффективный вынос урана идет в амфиболитовой и гранулитовой фации. Торий-урановое отношение резко возрастает до 30–50, с повышением давления от 5 до 9 кбар. В процессе мигматизации и чарнокитизации гранулитогнейсового субстрата, когда происходит вскрытие акцессорных минеральных фаз, выносятся не только уран, но и торий, отчасти редкие земли. Таким образом, было показано, что вынос урана из метаморфически измененных пород начинается в присутствии мобилизованных летучих еще задолго до плавления алюмосиликатных субстратов, а вынос тория — непосредственно перед их плавлением и в процессе частичного плавления и перемещения выплавов в верхние горизонты коры, где они накапливаются в гранитоидных плутонах.

Большинство сотрудников институтских лабораторий с радиоактивной тематикой оказались активными участниками второго и третьего совещаний в Душанбе и Томске. К этому моменту с помощью радиогеохимии решались вопросы перераспределения вещества в эндогенных и экзогенных процессах. Изучено влияние теплового потока земной коры Камчатки на поведение радиоактивных элементов.

Были подготовлены и защищены докторские диссертации А.С. Митропольским «Уран и торий в эволюции земной коры южной части Алтае-Саянской складчатой области» и В.П. Ковалёвым, посвященная петро- и радиогеохимическим параметрам изверженных пород герцинид Средней Сибири. В целом региональное радиогеохимическое картирование пород разных структурных этажей осадочной оболочки и внедренных в них интрузивных масс привело геохимиков к более адекватному представлению о глубинном строении земной коры. Эти вопросы рассмотрены в коллективной монографии Ю.М. Пузанкова, А.Д. Дучкова, С.В. Мельгунова, А.Д. Ножкина (1989) и в серии докладов на Первом всесоюзном симпозиуме «Геохимия в локальном металлогеническом анализе» (Новосибирск, 1986), посвященном 90-летию со дня рождения Ф.Н. Шахова. На симпозиуме активно выступили не только радиогеохимики В.А. Злобин, В.П. Ковалёв, С.В. Мельгунов, А.Д. Ножкин, Ю.М. Пузанков, но и ученые других направлений отдела геохимии — Г.Н. Аношин, А.Н. Дмитриева, И.Я. Некрасов (аспирант Ф.Н. Шахова, д.г.-м.н.), И.Н. и Ю.И. Маликовы, Н.В. Рослякова, В.Г. Цимбалест и Ю.Г. Щербаков.



«Слав экзогенной мысли»  
в экспедиции в Бурятии.

Г.В. Нестеренко (слева) и Ю.А. Калинин



В память об учителе материалы симпозиума были опубликованы в 1989 г. отдельной книгой «Геохимия рудообразующих систем и металлогенический анализ». Несколько раньше, в 1986 г., вышла в свет монография В.П. Ковалёва, в которой на достоверной статистической основе выделены серии девонских комплементарных выплавов мантийной и коровой природы, отличающиеся уровнями исходного радиогеохимического фона. А.Д. Ножкин (1997, 2004) показал важную роль радиоактивных элементов как индикаторов состава и эволюции континентальной земной коры юго-западной части Сибирской платформы.

Сознавая большое индикаторное значение радиоактивных и ассоциирующих с ними редких и редкоземельных элементов, Ф.Н. Шахов призывал к привлечению соответствующей геохимической информации для решения многих чисто геологических вопросов, в том числе геодинамического развития сегментов земной коры. Примером тому могут служить исследования, выполненные А.Д. Ножкиным и О.М. Туркиной.

В докторской диссертации О.М. Туркиной «Петрология докембрийских тоналит-трондьемитовых комплексов юго-западной окраины Сибирского кратона» (2002) на основе изотопно-геохимических данных обосновано многократное проявление тоналит-трондьемитового магматизма, сопряженного с главными этапами формирования докембрийской континентальной коры региона.

Позднее А.Д. Ножкиным и О.М. Туркиной в зоне перехода юго-западной части Сибирского кратона к Центрально-Азиатскому складчатому поясу установлена геолого-геохимическая гетерогенность, обусловленная аккреционной природой структур. С привлечением петролого-геохимических и изотопно-геохронологических методов ими выделены и изучены раннедокембрийские гранитогнейсовые и гранулитогнейсовые комплексы, зеленокаменные пояса, раннепротерозойский Ангарский окраинно-континентальный складчатый пояс, коллизионные и внутриплитные гранитоиды, блоки фемической ювенильной коры, представленные верхнерифейскими океаническими и островодужными комплексами с возрастом ~1,0, 0,7 и 0,64 млрд лет. Изучен состав и определен возраст метаосадочных толщ Дербинского блока и доказано проявление раннеордовикского синколлизионного метаморфизма и гранитоидного магматизма.

Исследования раннепротерозойских гранитоидов Ангаро-Канского, Бирюсинского блоков и структур Прибайкалья позволили выделить два этапа гранитообразования: постколлизионный (1,87–1,84 млрд лет) и анорогенный (1,75 млрд лет). Показано, что в постколлизионной обстановке происходило становление гранитоидов различных геохимических типов, обусловленное плавлением различных уровней архейской коры. А.Д. Ножкиным и О.М. Туркиной создана общая петролого-геохимическая модель формирования земной коры докембрия юга Сибирского кратона и его складчатого обрамления с использованием идей глубинной геодинамики: обоснованы основные рубежи в истории образования, роста и эволюции докембрийской континентальной коры; по результатам массовых Sm-Nd изотопных исследований с учетом геохронологического датирования выделено пять изотопных докембрийских коровых провинций; установлен дискретный трехэтапный рост протерозойской коры в обрамлении архейского кратона; в структурах протяженного аккреционного пояса обосновано выделение двух главных эпох аккреционно-коллизионных процессов — поздневендского (600–550 млн лет) и каледонского (510–480 млн лет).

Весьма важным представляется выделение и петролого-геохимическое исследование пяти этапов рифтогенного и внутриплитного магматизма в пределах Центрально-Енисейского металлогенического пояса Енисейского кряжа, оказавшего, по мнению А.Д. Ножкина, существенное влияние на формирование рудных концентраций золота, урана, редких металлов. Масовым геохимическим опробованием пород докембрия в пределах этого рудного пояса и за его пределами доказано существенное превышение над фоном урана в натрий-калиевых риолитоидах и их туфах, гранитогнейсовых куполах и базальных грубообломочных горизонтах, к которым и приурочены урановые месторождения и рудопроявления; повышенные содержания золота установлены в углеродистых терригенных сланцах, метапикрит-базальтовых вулканитах и интрузивных породах основного состава. С ними обычно ассоциируют золоторудные месторождения. Все это позволяет считать, что такие геохимически специализированные породные комплексы являлись одним из важных источников металлов в рудах (Ножкин, Туркина, 2008).

Что касается прикладного аспекта исследований, то с точки зрения А.Д. Ножкина и В.П. Ковалёва, наиболее благоприятные геолого-геохимические предпосылки для формирования уранового оруденения в структурах юга Сибири существовали в Центрально-Енисейском и Бирюсинском сегментах, а также в Забайкалье в блоках с погруженным слабоэродированным докембрийским сиалическим основанием и в неоднократно гранитизированных блоках Алданского щита. Однако открыть здесь крупные месторождения так и не удалось. Масштабное оруденение на платформе, по мнению Н.П. Лавёрова, следует ожидать в зонах структурного несогласия и метаморфизма толщ раннего докембрия (Енисейский кряж, северное погружение Алданского щита), а в складчатых сооружениях Центрально-Азиатского



Всё самое дорогое: знания, умение, внимание, впечатления — «молодой поросли, будущему геохимии». А.Д. Ножкин и О.М. Туркина в маршруте со студентами НГУ





складчатого пояса — в блоках ранней консолидации с докембрийским кристаллическим основанием типа Кокчетавского, Аргунского, Богемского массивов, характеризующихся повышенным содержанием U и Th и многостадийным формированием натрий-калиевых гранитоидов, обогащенных редкими и радиоактивными элементами, и проявлениями риолитоидного магматизма.

Наиболее важными показателями перспективности крупного блока земной коры на урановое, уран-ториевое и сопутствующее редкометалльное оруденение являются: степень геохимической дифференцированности — зрелости раннедокембрийских сиалических масс, уровень их эродированности, индикатором которого может быть содержание Th и величина Th/U. Именно эти важные критерии отражают причину и указывают на дальнейшую возможность формирования в первую очередь урановорудной провинции и унаследованный характер разнотипного и разновозрастного оруденения. Такая кора отражает геохимическую специфику зрелой мантии и всего литосферного профиля, в пределах которого формируются рудообразующие системы в разные эпохи геодинамической эволюции данного сегмента Земли (Ножкин, 1982; и др.).

В целом геолого-радиогеохимические исследования, проведенные сотрудниками отдела геохимии института в пределах выступов фундамента Сибирской платформы и ее складчатого обрамления, а также в сравнительном плане на других кристаллических массивах и фанерозойских структурах, подтверждают идеи Ф.Н. Шахова о неразрывной связи эндогенных рудных концентраций с историей развития соответствующих блоков коры и эволюцией породообразующих систем, которые предшествовали и сопутствовали оруденению. Это касается: проблемы формирования урановых и уран-ториевых провинций на общем повышенном фоне этих элементов в определенных сегментах коры; роли специализированных на уран комплексов как потенциальных источников металла гидротермальных месторождений; унаследования геохимических свойств исходного субстрата палингенными магмами при формировании гранитогнейсовых куполов и параавтохтонных рудоносных гранитоидных плутонов; важной роли летучих в формировании геохимического фона редких и радиоактивных элементов, а также рудного сопровождения магматического и постмагматического этапов.

При создании лаборатории геологии и геохимии редких и радиоактивных элементов одной из задач были обоснование и прогноз месторождений радиоактивного сырья. Несмотря на значительные успехи, представленные на радиогеохимических совещаниях, этого не случилось. По-видимому, одной из причин являлась региональная ограниченность работ и исследование в качестве основных возможных источников урана магматических пород щелочного и кислого состава, но главной причиной была закрытость организаций первого главка, которые не допускали к своим богатейшим геологическим фондам и в целом не приветствовали любое сотрудничество с академическими институтами (за редким исключением, в частности ИГЕМ РАН, благодаря Н.П. Лавёрову).