

**РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ**

Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, Н.В. Барановская, А.В. Волостнов, Т.А. Архангельская, А.М. Межибор, В.В. Берчук, Л.В. Жорняк, Ю.Л. Замятина, А.Ю. Иванов, А.В. Таловская, С.С. Шатилова, Е.Г. Язиков

Томский политехнический университет  
E-mail: leorikh@b10.tpu.edu.ru

*Обсуждается индикаторная роль естественных радиоактивных элементов (U, Th) в геосферных оболочках и различных компонентах природной среды, а также рассматриваются проблемы техногенных радионуклидов.*

На сегодняшний день носителей явления радиоактивности – радиоактивных изотопов – во всех материальных объектах реального мира, его геосферных оболочках насчитывается многие сотни. По существу дела, все химические элементы таблицы Д.И. Менделеева имеют радиоактивнее изотопы. Одни из них были присущи природным объектам всегда (U, Th,  $^{40}\text{K}$  и др.), другие в небольшом количестве формировались в результате взаимодействия природных атомов с космическим излучением ( $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$  и др.), а значительная часть радиоизотопов и радиоэлементов является продуктом рукотворной деятельности человека (Pu, Am,  $^{137}\text{Cs}$  и др.).

Благодаря уникальному свойству радиоактивных элементов переходить из неравновесного состояния в равновесное с испусканием гамма-квантов или заряженных частиц ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) определенной энергии, эти компоненты идентифицируются практически в любых природных объектах, что позволяет широко использовать их как определенные индикаторы.

«Всюдность» радиоактивных элементов в материальном мире на сегодняшний день хорошо показана исследованиями многих поколений ученых. В справочниках или энциклопедиях по геофизике и геохимии [1–3] предложены кларки содержаний (или их оценочный уровень) радиоактивных элементов, а также радиоактивных изотопов стабильных химических элементов в различных компонентах природной среды, как естественного, так и техногенного происхождения [4–6].

Сегодня можно утверждать, что радиоактивность является фундаментальным свойством материи, а ее носители, в тех или иных количествах, встречаются абсолютно во всех материальных объектах. Они были, есть и будут всегда.

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 ( $^{40}\text{K}$ ), являющийся  $\beta$ -излучателем с большим периодом полураспада.

Геохимия естественных радиоактивных элементов, особенно, урана и тория в природных объектах различных геосферных оболочек планеты изучены

сравнительно полно. Прежде всего, это касается литосферы.

Работами советских и российских геологов В.И. Вернадского, А.П. Виноградова, Д.И. Щербакова, В.И. Баранова, В.И. Гарасимовского, А.И. Перельмана, В.В. Щербины, 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.А. Смылова, В.Е. Плющева, Г.Б. Наумова, М.Н. Альтгаузена, Ф.А. Алексеева, Р.П. Готтих, Н.А. Титаевой, С.Г. Неручева, А.И. Германова и многих других, а также зарубежных специалистов: Adams, Larsen, Roders, Lovering, Sackett, Rosholt, Husmann, Heier, Davis, Tatsumoto, Vine e.a., основательно изучена геохимия радиоактивных элементов в геологических процессах.

Подводя краткое резюме их работ и не менее фундаментальных исследований сибирских геохимиков, в том числе Томской радиогеохимической школы по этому направлению (Ф.Н. Шахов, Ф.П. Кренделев, В.М. Гавшин, А.С. Митропольский, С.М. Жмодик, А.Г. Миронов, А.Д. Ножин, Л.П. Рихванов, С.И. Арбузов, В.А. Гавриленко, Ю.М. Пузанков, В.А. Злобин, В.И. Климов, В.А. Бобров, А.М. Гофман, А.А. Куликов, Ю.А. Фомин, В.В. Ершов, А.В. Волостнов и др.), можно сделать следующий генеральный вывод: радиоактивные элементы можно 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 радиоактивного сырья [7].

На сегодняшний день установлены основные закономерности их поведения и накопления в различных геологических образованиях. Так, например, в ряду нарастающей кремнекислотности-щелочности содержание урана и тория возрастает, достигая своего максимума в щелочных гранитах [8]. Эта закономерность может нарушаться только в щелочных, щелочно-ультраосновных и ультраосновных породах. Выявленная статистическая взаимосвязь между естественными радиоактивными

элементами (ЕРЭ) и петрохимическими показателями, позволила некоторым авторам [9] предложить радиогеохимический ключ-определитель магматических пород в координатах  $a-Q$ .

Достаточно уверенно просматривается тенденция возрастания ЕРЭ от ранних магматических комплексов или фаз к поздним, что отражает общую закономерность обогащения ураном и торием остаточных расплавов. Наиболее ярко основополагающие выводы по геохимии урана в гранитоидах были сделаны Л.В. Таусоном [10], по его методике они сводятся к следующему:

- в гранитоидах уран присутствует практически во всех минералах, т. е. является по определению В.И. Вернадского «всюдным» [11]. При этом одна его часть находится в акцессориях, другая – приурочена к породообразующим минералам. В породообразующих минералах уран находится в форме молекулярного рассеяния и в виде субмикроскопических собственных минералов урана;
- в гранитоидах уран кристаллохимически связан с редкими землями, иттрием, цирконием и торием, т. е. элементами с близкими ионными радиусами и зарядами;
- геохимическая история урана в процессе дифференциации магм не связана ни с одним из породообразующих элементов (Si, K, Na и др.);
- в процессе дифференциации магматических очагов гранитоидного состава уран накапливается в поздних дифференциатах;
- часть урана в гранитоидах находится в подвижном состоянии (слабо связанной форме) и легко выщелачивается раствором углекислого аммония  $[(NH_4)_2CO_3]$  без добавления перекиси водорода  $[H_2O_2]$ . На долю такого урана приходится от 20 до 70 % всего объема металла.

Радиоактивные элементы в магматических породах являются надежными индикаторами геодинамических обстановок их формирования и потенциальной рудоносности [8, 12–14].

При этом не только уровни накопления радиоактивных элементов в природных образованиях представляют интерес для исследователей.

Прежде всего, в прикладном и теоретическом аспекте важным показателем являются отношения валовых содержаний урана к торию (Th/U). Этот показатель, как свидетельствуют наши [13, 14] и другие исследования [8, 15] 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 распространении тория и урана, определяющейся законами мироздания [16].

Система постоянства соотношения урана и тория выдерживается во многих горных породах, за исключением химических и биогенных образований, продуктов метаморфизма и метасоматизма, т. е. достаточно динамичных природных систем с участием воды (рис. 1).

Для магматических пород данное отношение может быть критерием правильности отнесения исследуемых пород к магматитам. Если соотношение Th/U меньше 2, а, тем более, меньше 1, то однозначно можно утверждать, что изучаемая выборка относится не к магматическим образованиям, а к метасоматическим или метасоматически преобразованным породам [14].

Исключения могут составить ультраосновные породы и примитивные океанические базальты, характеризующиеся низким уровнем ЕРЭ, и практически всегда находящиеся в стадии метасоматического (метаморфического) преобразования.

В связи с тем, что современные аналитические методы (ICP-MS и др.) дают возможность определять уран и торий в любых породах, то при характеристике тех или иных петрохимических или металлогенических типов существует возможность проверки правильности соответствия данной выборки магматическому объекту.

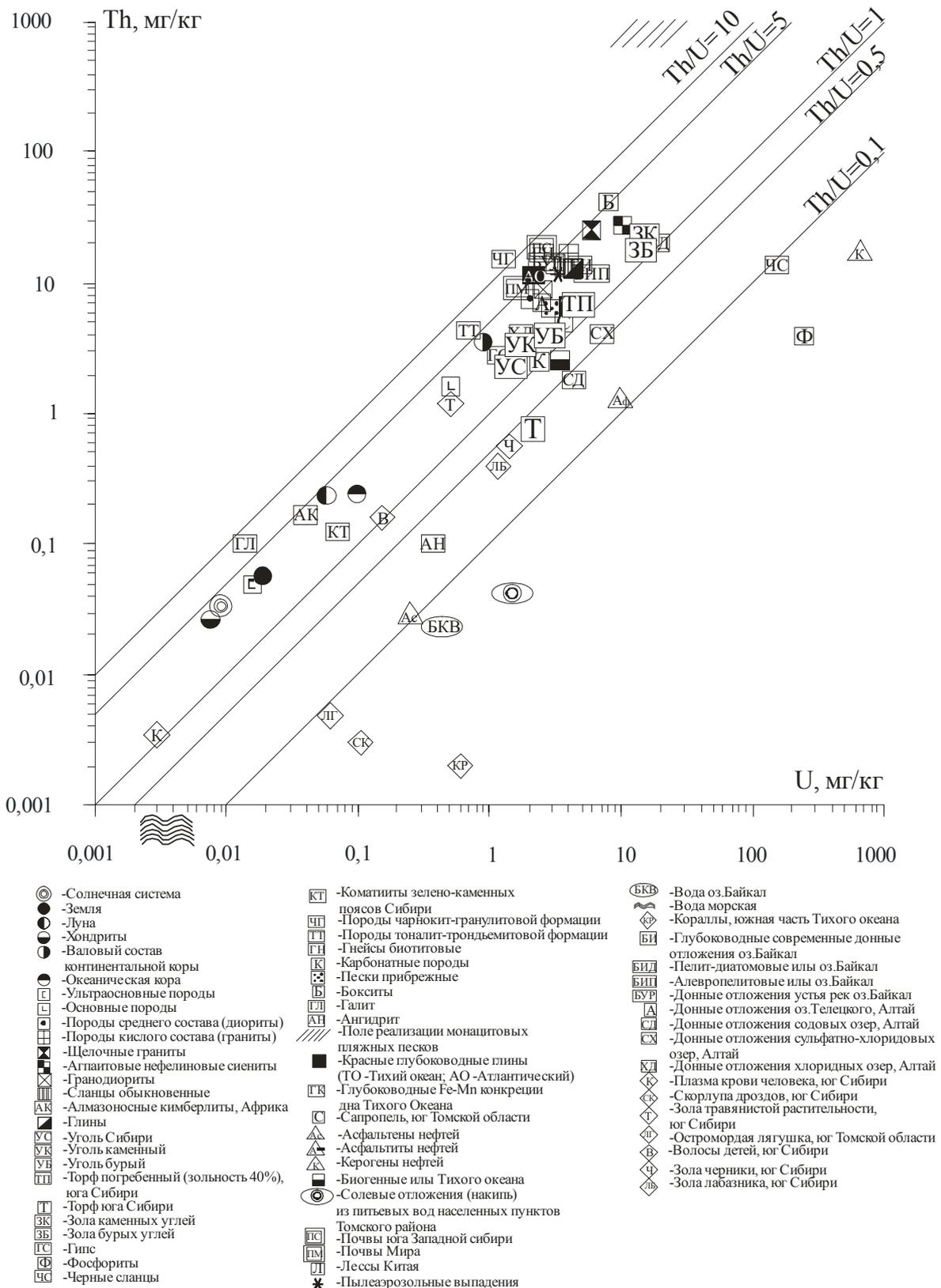
Например, в Горном Алтае выделен новый тип редкометальных литиевых гранитов (Аллахинский массив), но породы данного массива характеризуются аномально низкими отношениями тория к урану. Это ставит под сомнение возможность выделения этого нового типа гранитоидов [13]. Аналогичная ситуация складывается и в других районах.

Многие исследователи [17, 18], в своих работах особо отмечают, что в зонах проявления гидротермально-метасоматических процессов увеличивается и дисперсия в распределении триады естественных радиоактивных элементов. При этом делается чрезвычайно важный фундаментальный теоретический и практический вывод о том, что «в пределах однородного распределения ЕРЭ нельзя рассчитывать на обнаружение эндогенных концентраций нерадиоактивного рудного сырья» [13, 19]. Это, по существу дела, является парадигмой радиогеохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых и не только рудных.

В связи с этим, показатели дисперсии распределения ЕРЭ, нарушение корреляционных связей между ЕРЭ и отношения ЕРЭ используются нами при прогнозировании и поисках месторождений углеводородов, разбраковке структур по степени их благоприятности для локализации углеводородов [20–22].

Также установлено, что индикаторной ролью обладают и величины взаимосвязи радиоактивных элементов с другими рудными компонентами.

Например, для гидротермальных месторождений зон тектономагматической активизации Забайкалья является характерной корреляционная связь ЕРЭ с Mo, Ag, Sb, Hg и некоторыми другими элементами [19].



**Рис. 1.** Генерализованная схема радиогеохимических характеристик объектов геосферных оболочек. Примечание: при составлении схемы использовались данные из опубликованных источников, указанных в списке литературы, а также в работах С.И. Арбузова, В.М. Гавшина, А.А. Богуславского, А.Д. Ножкина, Р.П. Готтих, Б.Л. Щербова, Я.Э. Юдовича, В.Д. Пампуры, И.В. Сандимирова, Г.М. Шора, Е.Г. Язикова, Н.В. Барановской, А.Ю. Шатилова, И.Т. Кудашева, С.Р. Тейлора, Adams, Junliang Tian, Whitehead, Kunzendorf, Anders, Ganapathy и др.

Этот вывод подтвержден нами при изучении рудных формаций Алтае-Саянского региона [14]. Использование радиогеохимического метода позволяет решать многие геологические задачи, в том числе и в нестандартных ситуациях, например, при работах в полях развития траппового магматизма, при прогнозировании и поисках месторождений платиноидов Кингашского типа в Восточном Саяне.

Так, нами установлено, что рудоносные интрузии Норильско-Талнахского типа имеют достаточно четкие радиогеохимические особенности [23].

Весьма показательными характеристиками, в том числе, торий-урановым отношением, обладают комплексы осадочных пород. На примере изучения толщ докембрия Енисейского кряжа Ф.П. Кренделевым [17] и др. установлены закономерности изменения, связанные с прерывистостью осадконакопления, сменой областей сноса.

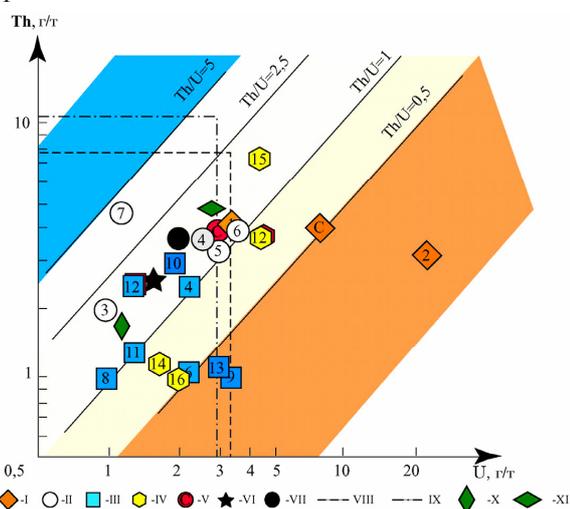
При формировании терригенных пород отчетливо просматривается тенденция возрастания содержания урана и тория в ряду: конгломераты – гравелиты – песчаники – алевролиты – аргиллиты. И только в осадочных породах прибрежных фаций (пляжные пески), а также в породах, обогащенных органическим веществом и фосфором, эта тенденция нарушается. При этом многими исследователями отмечается прямая корреляционная связь между содержанием углеродистого вещества и фосфора с ураном и торием [8].

Максимум накопления урана фиксируется в породах, в которых углеродистое вещество находится в форме асфальтитов, керитов, антракосолитов, при участии которых формируются породы, так называемой, черносланцевой формации, характеризующиеся не только повышенной ураноносностью, но и высоким содержанием благородных и редких элементов (рис. 1).

Углистые породы и угли только в редких случаях имеют аномально высокие содержания урана, а тем более тория (рис. 2). Они обусловлены, как правило, наложенными эпигенетическими процессами и окислением углей. В этих образованиях отсутствует прямая взаимосвязь радиоактивных элементов с органическим веществом, тогда как она выявляется с зольностью, с количеством редкоземельных и редких элементов [24–29].

Об индикаторной роли ЕРЭ при осадкообразовании можно судить по результатам изучения плейстоценовых флювиогляциальных отложений в виде прекрасно сформированных ленточных глин разновозрастных уровней Алтая. Так, наиболее древние из них, с возрастом около 260 тыс. л. имеют высокое Th/U отношение (8,2); а по уровню накопления Th (18 г/т) они близки к глинистым отложениям Баренцева моря. Близкими к этому показателю являются ленточные глины с возрастом около 25...30 тыс. л (Th/U=10; Th=18,3), тогда как аналогичные образования с возрастом 100 тыс. л имеют радиогеохимические характеристики близкие к современной оценке верхней континентальной

ной коры (Th/U=3,5; Th=10,2 г/т). Это свидетельствует о резком изменении состава материала области формирования ледников. Наличие осадочных толщ с высоким торий-урановым отношением может свидетельствовать о существовании в Горном Алтае коры высокой степени зрелости, подвергшейся интенсивной ледниковой переработке. Следует отметить, что отложения озерно-аллювиальных песчано-гравийных комплексов верхних террас р. Катунь (нижняя часть среднего плейстоцена) по радиогеохимическим характеристикам близки к составу верхней континентальной земной коры (Th/U=3,1...5,4; Th=9,2...12) и к составу ленточных глин с возрастом 100 тыс. л (район пос. Иня, Республика Алтай). Хемогенные и биогенные осадки, как правило, в значительной степени обогащены ураном, нежели торием. Поэтому эти образования характеризуются низкими показателями торий-уранового отношения.



**Рис. 2.** Радиогеохимическая характеристика углей Центральной Сибири: I – девонская эпоха угленакопления; II – карбон-пермская эпоха угленакопления; III – мезозойская эпоха угленакопления; IV – кайнозойская эпоха торфо-угленакопления; V – среднее для эпохи; VI – среднее для региона; VII – угольный кларк; VIII – среднее для осадочных пород (по Н.А. Григорьеву, 2003); IX – среднее для континентальной земной коры (Тейлор, Мак Леннон, 1988); X – угли США; XI – угли Китая. Угольные бассейны и месторождения: 1) Барзасское, 2) Убруское, 3) Горловский, 4) Кузнецкий, 5) Минусинский, 6) Тунгусский, 7) Курайское, 8) Пыжинское, 9) Канско-Ачинский, 10) Иркутский, 11) Улугхемский, 13) Западно-Сибирский, 13) Среднее для АССО, 14) Талду-Дюргунское, 15) торф погребенный, 16) торф современный

В целом это отражает основные отличительные черты геохимии урана и тория в природе, обусловленные состоянием валентности тория (только четырех валентное состояние) и урана (четырёх и шести валентное состояние), с образованием специфических соединений. Например, нахождение 6-валентного урана в форме уранил-иона ( $UO_2^{+2}$ ). Все это, в конечном итоге, обуславливает различную их растворимость во флюидах. Так, растворимость  $Th^{+4}$  и  $U^{+6}$  в воде различается на три порядка.

Именно этот фактор, прежде всего, обуславливает разделение геохимической судьбы U и Th в гидротермальных, экзогенных, биогенных и некоторых техногенных процессах. Содержание урана резко преобладает над торием в морской и пресной воде, плазме крови и в живом веществе вообще. Живое вещество, как отмечал В.И. Вернадский [11], выступает концентратором урана. И только в зольной составляющей биоты, например, растениях, или ороговиканном веществе (волосы) Th/U отношение достигает 1 и бывает даже выше (рис. 1). На наш взгляд, важным показателем радиогеохимических особенностей воды являются ее солевые отложения (накипь), отражающие все ее геохимические особенности [30].

Уровни накопления урана и тория в некоторых природных объектах Сибири, исследованных нами, приведены в табл. 1.

Следует отметить, что их концентрация в биоте определяется не только естественными факторами, но и техногенными [31]. При этом величина Th/U отношения становится весьма информативным показателем степени техногенной трансформации природной среды. Особенно отчетливо это наблюдается при изучении волос (рис. 3).

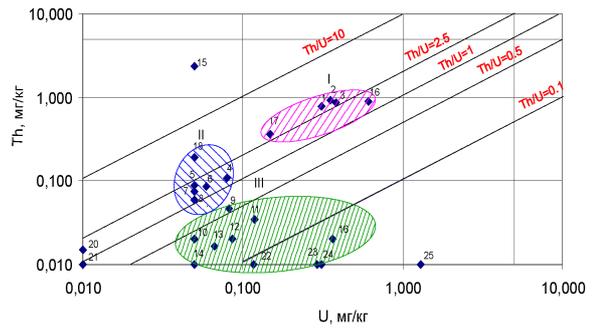
Аналогичная картина наблюдается и при рассмотрении радиогеохимических особенностей пылеаэрозольных выпадений (рис. 4).

**Таблица 1.** Содержание урана и тория, мг/кг, в различных компонентах природной среды Сибири и Томской области

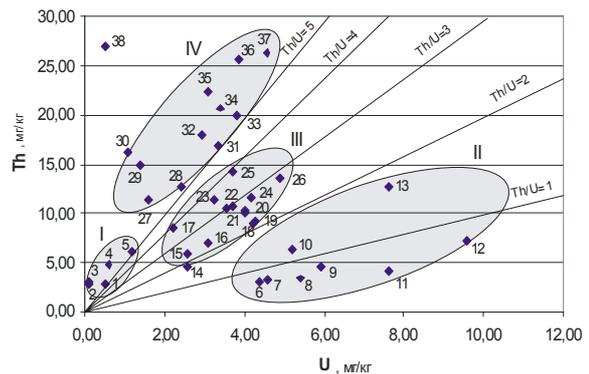
| Компоненты среды   | U: $x \pm \Delta x$ (n)<br>min...max     | Th: $x \pm \Delta x$ (n)<br>min...max         | Th/U |
|--|--|---|------|
| Уголь, Сибирь  | $1,5 \pm 0,4$ (3600)<br><0,1...300       | $2,4 \pm 0,4$ (3600)<br><0,5...28             | 1,6  |
| Верховой торф, Западно-Сибирский регион                        | $0,2 \pm 0,03$ (266)<br>0,04...1,22      | $0,5 \pm 0,04$ (266)<br>0,13...2,43           | 0,4  |
| Почва  | $2,5 \pm 0,1$ (1239)<br>0,1...10,8       | $9,9 \pm 0,2$ (1239)<br>1,5...23,9            | 4,0  |
| Накипь питьевой воды   | $1,48 \pm 0,17$ (186)<br>0,06...66,4*    | $0,17 \pm 0,05$ (186)<br>0,01...7,5           | 0,1  |
| Зола травянистой растительности                                | $0,26 \pm 0,08$ (35)<br>0,1...2          | $0,8 \pm 0,3$ (35)<br>0,04...9,1              | 3,1  |
| Снеготалая вода ледника Актру (Алтай), мкг/л                   | 0,02**                                   | 0,01**  | 0,5  |
| Твердый осадок снеготалой воды ледника Актру (Алтай)           | $3,7 \pm 0,2$ (25)<br>2,1...6,3          | $7,0 \pm 0,2$ (25)<br>5,7...9,5               | 1,89 |
| Донные отложения озер юга Томской области                      | $3,4 \pm 0,5$ (165)<br>0,8...35,2        | $6,6 \pm 0,5$ (165)<br>2,2...11,5             | 1,94 |
| Зола лишайника, Томский район                                  | $3,11 \pm 0,48$ (19)<br>0,5...6,5        | $5,29 \pm 0,53$ (19)<br>2,6...10,8            | 1,7  |
| Скорлупа яиц птиц семейства дроздов                            | $0,11 \pm 0,003$ (52)<br>0,1...0,23      | $0,03 \pm 0,002$ (52)<br>0,02...0,06          | 0,3  |
| Щитовидная железа взрослого человека, патологически измененная | $0,28 \pm 0,07$ (59)<br>0,2...4,5        | $0,02 \pm 0,003$ (59)<br>0,007...0,12         | 0,1  |
| Волосы детей   | $0,16 \pm 0,005$ (358)<br>0,01...0,58    | $0,09 \pm 0,02$ (358)<br>0,004...3,5          | 0,6  |
| Кровь  | $0,14^{**} \pm 0,02$ (128)<br>0,01...2,5 | $0,013^{***} \pm 0,001$ (128)<br>0,007...0,14 | 0,1  |
| Лягушка остромордая (Rana arvalis)                             | $0,04 \pm 0,006$ (18)<br>0,02...0,13     | $0,02 \pm 0,003$ (18)<br>0,001...0,04         | 0,5  |

\* – аномальные концентрации при расчете среднего не учитывались

\*\* – оценка среднего по единичным определениям



**Рис. 3.** Радиогеохимическая характеристика волос детей населенных пунктов Томской области. Группы населенных пунктов: I – со сравнительно высоким U и Th, при отношении Th/U=2,5; II – с низким содержанием U и Th, при отношении Th/U от 1 до 4; III – с низким содержанием U и Th, при отношении Th/U<1. 1–25 – населенные пункты: 1) Наумовка; 2) Георгиевка; 3) Самусь; 4) Губино; 5) Нелюбино; 6) Зоркальцево; 7) Копылово; 8) Воронино; 9) Семилужки; 10) Конинино, Корнилово, Черная речка (Томь), Лоскутово; 11) Томск; 12) Рассвет; 13) Сайга; 14) Кижирово; 15) Моряковский Затон; 16) Орловка; 17) Козюлино; 18) Октябрьское, Березкино; 19) Черная речка (Юкса); 20) Филимоновка, Семеновка; 21) Новоиколаевка; 22) Половинка; 23) Бакчар; 24) Бундюр; 25) Северск



**Рис. 4.** Радиогеохимическая типизация твердого осадка снегового покрова фоновых и урбанизированных территорий Западно-Сибирского региона. I – фоновая область, II–V – зоны разной степени влияния промышленных предприятий. 1) с. Мыльджино; 2) г. Мегион; 3) с. Средний Васюган; 4) г. Стрежевой; 5) Заказник «Томский»; 6) Зырянское; 7) Семеновка; 8) Новокусково; 9) г. Усть-Каменогорск (Ульбинский комбинат); 10) Новониколаевка; 11) Минаевка; 12) Филимоновка; 13) Поросино; 14) Берлинка; 15) Коломино; 16) Лучаново; 17) ОАО «Сибэлектро-мотор», г. Томск; 18) Тимирязево; 19) г. Томск; 20) г. Междуреченск; 21) Калтай; 22) совхоз «Томь»; 23) г. Северск; 24) г. Рубцовск; 25) Северный промышленный узел, г. Томск; 26) с. Виленка; 27) с. Каргала; 28) с. Бакчар; 29) с. Орловка; 30) с. Кижирово; 31) свз. Степановский; 32) с. Козюлино; 33) п. Джержинский; 34) с. Моряковский Затон; 35) с. Самусь; 36) Георгиевка; 37) с. Наумовка; 38) п. Красный Яр

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 суще-

ственно ниже [32]. Он отклоняется от нормы и в зонах их преобразования под воздействием флюидных потоков от залежей углеводородов, находящихся на глубинах несколько км [20–22].

Следует отметить, что изучение динамики поступления урана в биосферу с использованием торфов свидетельствует о его более интенсивном поступлении в последние 60 лет с максимумами накопления в 60–70 гг. XX столетия [13]. При этом одновременно с ним происходят поступления Рu и других техногенных радионуклидов (рис. 5), что свидетельствует об общности источника их поступления.

При этом достаточно четко отмечается более высокий (в два и более раза) уровень накопления урана и тория в низовых болотах относительно верховых. Максимальные концентрации урана фиксируются в торфяных залежах, находящихся в непосредственной зоне влияния предприятий ядерно-топливного цикла [33].

Еще одним чрезвычайно важным радиогеохимическим показателем в геосферных оболочках является отношение изотопов  $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ , которое является физической константой на определенный момент времени и определяется на сегодняшний день величиной 137,8. Отклонение от этого значения в ту или иную сторону свидетельствует о том, что либо происходили процессы ядерного деления с выгоранием  $^{235}\text{U}$ , как это, например, было на природных ядерных реакторах, функционировавших 2,5...3,0 млрд л назад (месторождения урана Окло, Богомбо и др. в Африке) [34], либо имеет место воздействие предприятий ядерно-топливного цикла, занимающихся разделением изотопов уран (г. Северск, г. Ангарск и др.) или другими видами деятельности, в том числе проведением ядерных взрывов любого характера, при которых происходит разделение или образование этих изотопов. Нами и американскими учеными (Drew Coleman e.a.) показано, что это отношение в зоне такого влияния может изменяться от 1 до 500.

В результате испытания ядерного оружия, развития ядерной энергетики, начиная с 1945 г., во всех природных средах (почве, воде, биоте и т. д.) появились совершенно новые, ранее неизвестные в природе радиоактивные элементы и их изотопы (технеций, прометий, плутоний, америций,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  и др.) [6, 35, 36]. До этого времени они могли бы быть обнаружены на планете только в некоторых локальных точках, где около 2 млрд л назад функционировали природные ядерные реакторы [34]. Испытания ядерного оружия (ЯО) на испытательных полигонах мира привело к существенному изменению геохимического состава геосферных оболочек [6, 37, 38]. Аналогичная ситуация сложилась в местах проведения подземных ядерных взрывов (ПЯВ) и районах расположения предприятий ядерно-топливного цикла (ПЯТЦ).

Прежде всего, это выразилось в массовом поступлении в биосферу техногенных радиоактивных элементов (ТРЕ) с разными ядерно-физическими (периодом полураспада, видом энергий радиоактивного излучения), геохимическими и биологическими свойствами [6, 35].

Так, наши исследования [39, 40] показали, что уровень накопления делящихся элементов ( $^{235}\text{U}$ , Рu, Am и других трансурановых элементов) в природной среде увеличился в глобальном масштабе в 2...3 раза, а в отдельных локальных участках – местах расположения испытательных ядерных полигонов (ИЯП) этот уровень изменился более существенно.

В период массового испытания ЯО радиологическая обстановка прежде всего оценивалась по мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения и по суммарной бета-активности осадков. Это позволяло в то время оперативно оценивать общую радиационную ситуацию. Этот подход сохранился и до сегодняшнего дня, когда нормирование территорий по радиологическим параметрам оценивается по МЭД, плотности выпадения

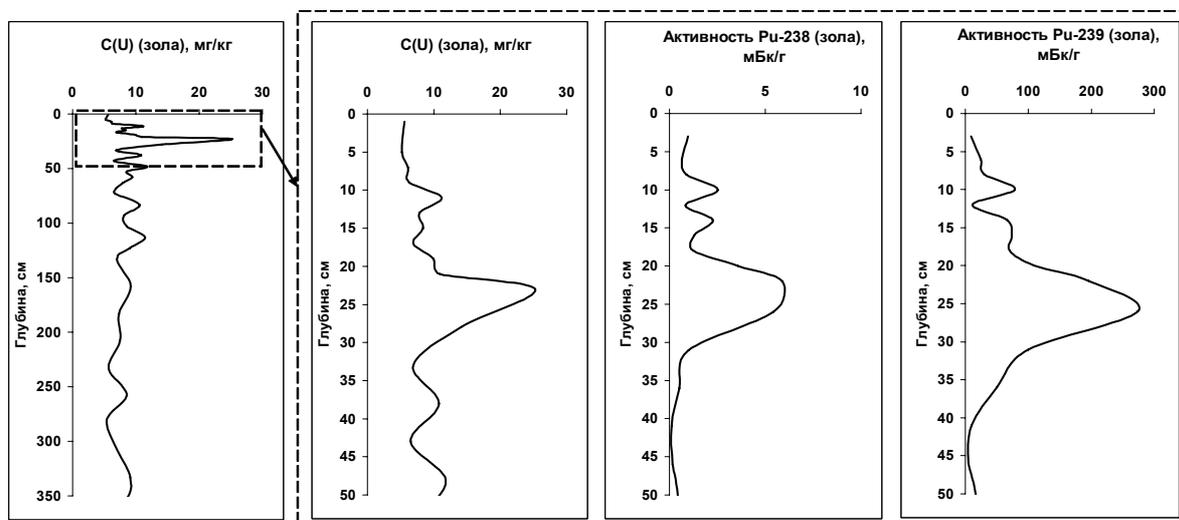


Рис. 5. Распределение урана и плутония в верховом торфянике района г. Томска

$^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ . После аварии на ЧАЭС стали оценивать и уровень накопления Pu, но установленный нормативный показатель (больше 0,1 Ки/км<sup>2</sup>) может характеризовать только аварийную зону, а не состояние территории, подвергнутой пролонгированному воздействию сравнительно низких концентраций техногенных радионуклидов.

Через десятилетия после окончания испытания ЯО в атмосфере короткоживущие и среднеживущие ТРЭ распались, сравнительно долгоживущие  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  частично распались, а также мигрировали с поверхности в более глубокие горизонты почв, либо в процессе площадной эрозионной деятельности перенесены в озера, западины и другие отрицательные формы рельефа. Поэтому традиционно применяемая ранее технология изучения радиэкологической обстановки, по существу дела, не отражает реальной обстановки. И совсем не удивительно, что в публикациях на эту тему, даже по ИЯП, можно встретить высказывание о том, что по уровню накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , исследованные на полигоне почвы не отличаются от общего глобального уровня, а МЭД отражает содержание естественных радиоактивных элементов (U, Th, K).

По гамма-излучающим компонентам картина выглядит именно так. И только более детальные исследования показывают, что на этих территориях велики концентрации Pu, Am. Радиэкологическая обстановка на ИЯП и территориях, прилегающих к ним, в настоящее время, как нам представляется, определяется и будет определяться в будущем уровнем накопления  $\alpha$ -излучающих долгоживущих радионуклидов, прежде всего Pu и Am [37].

Реальное положение дел с загрязнением природной среды этими компонентами еще слабо изучено [41]. Прежде всего, не определен глобальный уровень их выпадения. Анализ многочисленных публикаций в ведущих радиэкологических журналах мира, в том числе по территории России (M. Baskaran, K. Cochran и др.) показывает, что за такой вот может быть принята удельная активность Pu в почве на уровне 0,2...0,3 Бк/кг [37].

В местах проведения испытаний ядерного оружия, ядерных взрывов в мирных целях, в районах работы ПЯТЦ на сегодняшний день можно фиксировать и другие геохимические аномалии [35, 42]. Эти районы будут отличаться отношением изотопов урана в природных средах (почва и др.). Это достаточно хорошо показано по району Роки Флэтс в США, а также по району Сибирского химического комбината (СХК) [35, 42].

На сегодняшний день появляются надежные геохимические реперы, свидетельствующие о функционировании в тех или иных районах специфических ядерных природно-техногенных систем (ИЯП, ПЯВ, ПЯТЦ). Так, например, геохимическими признаками воздействия СХК на окружающую среду являются [35, 42, 43]:

- вышефоновые содержания (с превышением ре-

гионального фона в 2 раза и более) в почвах урана, плутония,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , лантана, самария, лютеция и некоторых других элементов; резко отличающиеся от природного отношения  $^{238}\text{U}$  к  $^{235}\text{U}$ ; присутствие большого количества делящихся элементов, часто в форме микровключений («горячих частиц») (Л.П. Рихванов, В.В. Архангельский, Ю.Г. Зубков и др.);

- превышение глобального уровня накопления в пылеаэрозольных выпадениях  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , некоторых других техногенных радионуклидов (Г.Г. Глухов, В.Г. Меркулов и др.) и специфических (Co, Be, Zr) тяжелых металлов (В.А. Зуев), редкоземельных элементов, урана и тория, а также нарушенные их соотношения между собой [35]. В твердом осадке снега [43] обнаруживаются техногенные минералы, характерные для этого типа производства (графит, оксиды урана и др.);
- присутствие в поверхностных и подземных водах в количествах, превышающих региональный фон в 2 и более раз, урана, трития, в некоторых точках  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ , фтора, ртути, трибутилфосфата и ряда других химических компонентов (В.А. Зуев, Ю.П. Туров, В.К. Попов и др.);
- обнаружение ртути в воде и других природных средах в районах предприятий ядерного топливного цикла, как, например, в США (K. Campbell и др. в районе Окриджа, штат Теннеси, США);
- выявление техногенных радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{14}\text{C}$ ), а также некоторых химических элементов (лантаноиды, уран, прометий и др.) как в отдельных органах, так и в организме в целом, в некоторых видах мелких млекопитающих и амфибий (Н.С. Москвитина, В.Н. Куранова, С.В. Савельев, В.Д. Несветайло и др.);
- изменение уровня накопления и характера соотношения редких и радиоактивных элементов в крови и волосах человека [31, 43];
- наличие техногенных радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{14}\text{C}$ ), а также делящихся элементов ( $^{235}\text{U}$ , Pu, Am и др.) и Hg в годовых кольцах срезов деревьев (В.Д. Несветайло, М.Г. Бузынный, Т.А. Архангельская, Л.П. Рихванов и др.);
- обнаружение техногенных, в том числе делящихся радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и др.) в речной рыбе (Ю.Г. Зубков, И.Г. Берзина, Н.Н. Ильинских), мясе крупных диких животных (А.Ю. Зубков), птиц (Н.Н. Ильинских).

Анализ закономерностей пространственной и временной локализации выявленных геохимических показателей свидетельствуют о том, что:

1. Индикаторные химические элементы в различных природных средах в зоне влияния ядерных объектов образуют единую структуру геохимического пространства, характеризующуюся вытянутостью оси ореола, по «розе ветров» или основным дренирующим водным потокам [37, 43].

2. Уровень накопления многих индикаторных компонентов в природных средах имеет выраженную тенденцию к увеличению по мере приближения к производствам ядерного цикла, хотя ряд элементов, например, уран, имеют иную тенденцию, что объясняется разной степенью летучести его соединений (гексафторид урана и др.).
3. Их поступление в природную среду имеет циклически неравномерный характер, как в течение одного года, так и в течение всего времени функционирования ядерных объектов.

Проблемы миграции и накопления техногенных радионуклидов в природных средах еще достаточно далеки от своего решения. С каждым годом появляются новые данные, которые свидетельствуют о чрезвычайной сложности геохимии техногенных радиоэлементов, что создает значительные трудности в учете их воздействия на биоту и человека [6, 35].

Сегодняшний уровень развития ядерно-физических методов анализа, в том числе дистанционных, дает возможность использовать радиоактивные элементы для решения вопросов разработки

новых методов поисков месторождений полезных ископаемых, в том числе углеводородов [30], дифференциации различных геолого-геохимических процессов, в том числе типизации пород [14], почв [32], минеральных удобрений, сапропелей [44], торфов [33], углей [24, 27], пылеаэрозольных выпадений [45], биоты [46], что показано исследованиями нашей группы, а также для решения экологических и, прежде всего, радиоэкологических задач, районирования территории по степени их техногенной трансформации и оценки степени безопасности среды обитания для проживания человека [43, 47].

«Всюдность» радиоактивных элементов, их прекрасные ядерно-физические характеристики, наличие большого объема информации по общим геохимическим особенностям ЕРЭ в природных процессах позволяют утверждать, что естественные радиоактивные элементы и их изотопы ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$ , Rn и др.) использовались, используются и будут использоваться как индикаторы для решения многих вопросов в науках о Земле, биологии и экологии, технологических процессах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник физических констант горных пород. – М.: Мир, 1979. – С. 482–502.
2. The Encyclopedia of Oceanography – Reinhold Publishing Corporation. – New York, 1966. – 775 p.
3. Handbook of Geochemistry. V. II/5/ Elements La(57) to U(92) – Berlin: Springer-Verlag; New York: Heidelberg, 1974. – 996 p.
4. Чердынцев В.В. Ядерная вулканология. – М.: Наука, 1978. – 208 с.
5. Hamilton E. J. Terrestrial radiation – an overview // Radiat. Phys. and Chem. – 1989. – V. 34. – № 2. – P. 195–212.
6. Fisenbud M., e.a. Environmental Radioactivity from Natural. – Industrial and Military Sources. – San Diego-London-Boston-New York-Tokyo-Toronto: Academic Press, 1997. – 639 p.
7. И лучшей судьбы не хотим. 50-летию со дня начала подготовки геологов уранщиков в Томском политехническом университете: Очерки / Под ред. проф. Л.П. Рихванова. – Алматы: Баस्ताу, 2004. – 208 с.
8. Смыслов А.А. Уран и торий в земной коре. – Л.: Недра, 1974. – 231 с.
9. Ермолаев Н.П., Соборнов О.П. Способ выражения радиогеохимических характеристик магматических горных пород в единой системе координат и его геохимическое приложение // Геохимия. – 1973. – № 6. – С. 803–815.
10. Таусон Л.В. Геохимия редких элементов в гранитоидах. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 230 с.
11. Вернадский В.И. Очерки геохимии. Избранные сочинения. – М.: Изд-во АН СССР, 1954. – Т. 1. – С. 7–390.
12. Ножкин А.Д. Петрогеохимическая типизация докембрийских комплексов Сибири: Автореф. дис. ... докт. г.-м. наук. – Новосибирск, 1997. – 98 с.
13. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация интрузивных образований Алтае-Саянской складчатой области: металлогенетические аспекты // Петрология метаморфических магматических и метаморфических комплексов. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – Т. II. – С. 122–129.
14. Рихванов Л.П. Радиогеохимическая типизация рудно-магматических образований. – Новосибирск: Изд-во СО РАН филиал «Гео», 2003. – 536 с.
15. Allegre C.V., Dupre B., Lewin E. Thorium/uranium ratio of the earth // Chem. Geol. – 1986. – V. 56. – № 3–4. – С. 219–227.
16. Озима М. Глобальная эволюция Земли. – М.: Мир, 1990. – 165 с.
17. Кренделев Ф.П. Кларки радиоактивных элементов в породах докембрия Енисейского кряжа. – М.: Наука, 1971. – 375 с.
18. Кренделев Ф.П., Миронов А.Г. и др. Применение гамма-спектрометрических методов для оконтуривания рудных зон в Забайкалье // Геология и геофизика. – 1976. – № 8. – С. 67–75.
19. Геохимия радиоактивных элементов и золота Забайкалья: Труды геологического института Бурятского филиала СО РАН / Отв. ред. Ф.П. Кренделев. – Новосибирск: Наука, 1979. – Вып. 9. – 148 с.
20. Рихванов Л.П., Соболев И.С., Лященко Н.Г. Радиогеохимические методы поисков месторождений нефти и газа // Прикладная геохимия. – М.: ИМГРЭ. – 2002. – Вып. 3. – С. 386–394.
21. Соболев И.С. Прогнозирование и поиски месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами в условиях Западно-Сибирского региона: Автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. – Томск, 1999. – 23 с.
22. Соболев И.С., Рихванов Л.П., Лященко Н.Г. Прогнозирование и поиски месторождений нефти и газа радиогеохимическими методами // Геология нефти и газа. – 1999. – № 7–8. – С. 19–24.
23. Рихванов Л.П. и др. Радиогеохимические особенности вулканогенно-интрузивных комплексов Норильского рудного района // Палеовулканизм Сибири: Тезисы докл. III регион. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 1991. – С. 43–45.
24. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири: Автореф. дис. ... докт. г.-м. наук. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 48 с.
25. Арбузов С.И., Ершов В.В., Поцелуев А.А., Рихванов Л.П. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна. – Кемерово, 2000. – 248 с.

26. Арбузов С.И., Ершов В.В., Рихванов Л.П. и др. Редкометалльный потенциал углей Минусинского бассейна. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. – 347 с.
27. Волостнов А.В. Уран и торий в углях центральной Сибири: Автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. – Томск, 2004. – 24 с.
28. Юдович Я.Э., Волостнов А.В., Кетрис М.П., Рихванов Л.П. Торий в углях. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 43 с.
29. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Уран в углях // Коми НЦ УРО РАН. – Сыктывкар, 2001. – 81 с.
30. Язиков Е.Г., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Индикаторная роль солевых образований в воде при геохимическом мониторинге // Известия вузов. Геология и разведка. – 2004. – № 1. – С. 67–79.
31. Барановская Н.В. Элементный состав биологических материалов и его использование для выявления антропогенно-измененных территорий (на примере южной части Томской области): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
32. Рихванов Л.П. Уран и торий в почвах // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С. 308–312.
33. Беляева А.М., Рихванов Л.П., Арбузов С.И. Исследование геохимического состава верхового торфа как метод мониторинга окружающей среды // Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии: Матер. Междунар. конф. – Томск, 2006. – С. 631–634.
34. Gauthier-Lafaye F. Natural nuclear fission reactors in Gabon // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 737–744.
35. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиоэкологии – Томск: Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
36. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. – М.: Изд-во МГУ, 2000. – 336 с.
37. Рихванов Л.П. К геохимии техногенеза // Актуальные проблемы геохимической экологии: Матер. V Междунар. биогеохимической школы, 8–11 сентября 2005 г. – Семипалатинск, 2005. – С. 48–51.
38. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в геосферных оболочках // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – С. 498–505.
39. Архангельская Т.А. Ретроспективная оценка радиоэкологической ситуации по результатам изучения годовых колец деревьев: Автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. – Томск, 2004. – 24 с.
40. Рихванов Л.П., Архангельская Т.А., Несветайло В.Д. Изучение уровня и динамики накопления делящихся радионуклидов в годовых кольцах деревьев // Геохимия. – 2002. – № 1. – С. 1238–1245.
41. Атурова В.П., Коваленко В.В. Плутоний в почвах Сибири // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Матер. Междунар. конф. – Томск, 2004. – С. 54–62.
42. Рихванов Л.П. Использование геохимических методов для изучения проявленности объектов ядерного комплекса // Проблемы поисковой и экологической геохимии. – Томск, 2003. – С. 197–199.
43. Рихванов Л.П. и др. Эколого-геохимические особенности природных сред Томского района и заболеваемость населения. – Томск: Курсив, 2006. – 215 с.
44. Иванов А.Ю., Архипов В.С., Судыко А.Ф. Уран и торий в донных отложениях озер юга Томской области // Геохимия и рудообразование радиоактивных, благородных и редких металлов в эндогенных и экзогенных процессах: Матер. Всеросс. конф. с иностранным участием, посвященной 50-летию Сибирского отделения РАН и 80-летию чл.-кор. РАН Ф.П. Кренделева: в 2 т. – Улан-Удэ, 16–18 апреля 2007. – Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2007. – С. 79–81.
45. Шатилов А.Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика пылевых атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: Автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. – Томск, 2001. – 24 с.
46. Baranovskaja N., Rikhvanov L. Trace elements in composition of biosubstates of people living in a district of the nuclear plant of Russia // Macro and trace Elements / 21 Workshop 2002. – Jena, 2002. – P. 1266–1271.
47. Язиков Е.Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. – Томск, 2006. – 48 с.

*Поступила 14.11.2006 г.*