

РАДИОАКТИВНОСТЬ И РАДИОАКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ГИДРОСФЕРЕ

Л.П. Рихванов

Томский политехнический университет, Томск, Россия, rikhvanov@tpu.ru

RADIOACTIVITY AND RADIOACTIVE ELEMENTS IN THE HYDROSPHERE

L.P. Rikhvanov

Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Рассмотрена история изучения радиоактивности и радиоактивных элементов в гидросфере. Приведены данные об алтайском феномене "Радоновое озеро", о ториевой природе термальных источников Тункинской впадины Отмечено, что высокие содержания урана в ряде типов вод могут служить его источником в будущем. Впервые показаны данные по содержанию урана и тория в воде некоторых живых организмов. Предложена диаграмма радиогеохимической типизации вод гидросферы, на которой показано существование ториевых типов вод. Выявленный новый геохимический нюанс требует своего изучения и объяснения.

*Всякая природная вода радиоактивна.**В.И. Вернадский*

С момента открытия в 1896 году гражданином Франции Анри Беккерелем явления радиоактивности и носителей этого явления – радиоактивных элементов, обстоятельно изученных Марией и Пьером Кюри, стало ясно, что "...это открытие произвело огромный переворот в научном мировоззрении, поставило перед жизнью и техникой практически новые задачи совершенно нового рода. Открыло горизонты возможностей, совершенно неожиданных и, казалось, навсегда для человечества закрытых" (В.И. Вернадский. "Задачи дня в области радиации", 1911. – С. 61–72).

Познание этого явления позволило решить ряд фундаментальных проблем естествознания (3, 5, 11, 27 и др.).

На сегодняшний день носителей явления радиоактивности – радиоактивных элементов и их изотопов во всех материальных объектах реального мира, его геосферных оболочках насчитывается многие сотни. По существу, дела, все химические элементы таблицы Д.И. Менделеева имеют радиоактивнее изотопы.

Одни из них были присущи природным объектам всегда (U, Th, K⁴⁰ и др.), другие в небольшом количестве формировались в результате взаимодействия природных атомов с космическим излучением (C¹⁴, H³ и др.), а значительная часть радиоизотопов и радиоэлементов является продуктом рукотворной деятельности человека (Pu, Am, Cs¹³⁷ и др.).

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

"Всюдность" радиоактивных элементов в материальном мире на сегодняшний день хорошо показана исследованиями многих поколений ученых. В справочниках или энциклопедиях по геофизике и по геохимии [26, 32, 37, 38, 43] нам будут предложены кларки (или их оценочный уровень) радиоактивных элементов, а также радиоактивных изотопов стабильных химических элемен-

тов в различных природных средах, как естественного, так и техногенного происхождения.

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 [18, 19, 20 и др.]: от Космоса до косных и живых систем нашей планеты. Высказанный тезис полностью относится и к водам гидросферы: от вод Мирового океана до воды живых организмов.

Вода стала одним из основных объектов исследования с самого начала открытия радиоактивности и ее носителей – радиоактивных элементов. Первый обзор о радиоактивности гидросферы и некоторых ее особенностях был выполнен В.И. Вернадским в своих знаменитых "Очерках геохимии", которые вышли впервые в Париже в 1924 г. (Вернадский, 1954). В этой и других своих работах по радиоактивности воды [3] он отмечает тех, кто стоял у истоков изучения этих показателей у воды: Е.С. Бурксер, И.А. Бергман, А.П. Соколов, В.Г. Хлопин, Л.В. Боговявленский, А.А. Черепенников, А.Н. Огильви, В.Т. Малышев, Л.В. Комлев, Б.А. Никитин, S. Vicente, Lepierre и др.

Среди природных вод, обогащенных радиоактивными элементами, на сегодняшний различают (Геологический словарь. Т.3. – СПб., ВСЕГЕИ, 2012):

- воду радоновую (активность радона до $7,5 \cdot 10^5$ Бк/дм³);
- воду радиевую (концентрация радия от $n \cdot 10^{-1}$ до $n \cdot 10^{-9}$ г/дм³);
- воду урановую (концентрация урана от $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$ г/дм³);
- смешанные воды.

Уже в первой четверти XX в. было установлено, что в природе между ураном (материнским изотопом) и продуктами его распада (дочерними изотопами) за тот или иной промежуток времени (для каждого изотопа свой) устанавливается так называемое радиоактивное равновесие. Так, между U и Ra оно составляет $3,4 \cdot 10^{-7}$, тогда

как между радоном и радием этот показатель составляет $1,484 \cdot 10^{-5}$.

Обращает на себя внимание, что при анализе радиоактивности вод гидросферы практически никогда не обсуждается ториевая природа радиоактивности воды. Априори считалось, еще со времен В.И. Вернадского, что Th и продукты его распада в воде присутствуют в столь ничтожно малых количествах, которые нельзя было зафиксировать. Как писал великий естествоиспытатель – торий стоит вне геохимии воды, торий не входит в водный режим Земли [3], хотя А.Н. Огильви в 1932 г., выступая на первой Всесоюзной конференции по радиоактивности (Архив Радиевого института, Ф. 1, опись 1, дело №29), отмечал, что во Франции тороновые воды использовались для лечения.

В настоящий момент времени это утверждение требует своего уточнения. Вся историю изучения этого направления в учении о радиоактивности гидросферы можно условно разделить на 3 этапа: радон-радиевый, урановый и комплексный разноплановый.

Это, прежде всего, было обусловлено развитием методов измерения радиоактивности и содержания радиоактивных элементов в воде (от простейшего электроскопа, до счетчика Гейгера–Мюллера и масс-спектрометрии в настоящее время) и практической потребностью народного хозяйства страны в ряде радионуклидов (Ra^{226} , U^{235}) или их свойств для использования, например, в лечебных целях.

Уже в начале XX в. наиболее активно радиоактивность воды исследовалась в Одесской радиологической лаборатории под руководством Е.С. Бурксера (первая на всем пространстве России. О ней смотри статью в данных материалах в разделе “Из плена лет”). В ней были определены радиоактивность Кавказских минеральных вод, минеральных вод Черноморского побережья, водопроводной воды в г. Одессе и т.д.

Было установлено, что радиоактивность минеральных вод Кавказа колеблется от пределов ниже обнаружения до 2,77 ед. Махе. Этот показатель колеблется во времени и не зависит от температуры воды. Протекание воды по длинным водопроводам уменьшает величину ее радиоактивности, что позволило предположить, газовую (эманационную) природу радиоактивности, обусловленную радоном (Rn).

Инженером-технологом Э.Э. Карстенсом, работавшим в химической лаборатории *Кавказских Минеральных Вод (КМВ)*, в 1907 г. начаты исследования минеральных источников района КМВ на радиоактивность. 2 декабря 1908 г. на заседании Русского бальнеологического общества в Пятигорске он доложил о результатах. Им была определена радиоактивность 26 минеральных источников и составлена таблица активностей минеральных источников по группам. Были изучены Пятигорские, Эссентукские, Железноводские, Кисловодские воды. Его исследования отличались от других тем, что измерение радиоактивности источников он проводил в полевых условиях, а не в лаборатории по истечении времени.

Значительные работы по изучению радиоактивности вод гидросферы велись в Сибири (П.П. Орлов,

М.П. Орлова, Л. Бертенсон, И.А. Багашев и др.). Обстоятельный анализ этой проблемы выполнил первый сибирский исследователь радиоактивности профессор ТГУ П.П. Орлов [12]. Профессор медицины И.А. Багашев уже в начале XX в. описал около 165 минеральных источников в Забайкалье, в том числе 61 из них охарактеризовал по показателям радиоактивности [1].

При проведении работ по изучению радиоактивных веществ в Забайкалье, профессор И.А. Багашев (1878–1934) отмечал высокую заболеваемость населения казачьих поселков, пользующихся в качестве источников питьевого водоснабжения водами из колодцев и ключей с высокой радиоактивностью (2,25–10, 22 ед. Махе).

Минеральные источники Алтая изучал лаборант Томского технологического института В.С. Титов. В 1907–1908 г. он со студентом В.П. Марковым исследовал на радиоактивность воды и газы Белокурихинских теплых источников [23]. Было определено, что радиоактивность воды и газа Белокурихинских терм в 9,4 раза больше радиоактивности воды и газа Нарзана. Им установлены суточные вариации радона в водах. Эти измерения имеют непреходящее значение и до сегодняшнего дня [10, 30].

Во всех ранее выполненных многочисленных исследованиях по определению активности Rn в воде обращалось внимание на то, что этот радиоактивный газ обнаруживается в повышенных количествах только в подземных водах и его мало в поверхностных водоемах в силу его летучести.

Однако исследования последних лет показали, что в некоторых особых случаях могут формироваться озера, имеющие значительную активность радона. Так, при выполнении гамма-спектрометрической съемки на Алтае в пределах листа М-45-VII была выявлена над одним из горных озер аэроаномалия радоновой природы (Мамонтов и др., 1990; Уваров и др., 2000. Отчеты в фондах Заб. Сиб. геол. упр.). Выполненная нами (Ю.П. Попов, Ю.В. Робертус, Л.П. Рихванов в 2002 г.) проверка этой аномалии подтвердила существование этого феномена [19]. Измерения, выполненные в полевых и лабораторных условиях, показали, что активность Rn составляет около 100 Бк/л. Содержание урана в воде составляло 10–7 г/л, при концентрации Ra на уровне предела обнаружения.

Итак, к двадцатым годам XX в. было четко установлено, что все природные воды содержат продукты распада урана (радон), обуславливающего радиоактивность воды и ее некоторые бальнеологические свойства. Активность радона в воде колеблется в значительном диапазоне, от предела измерения (0, n-p Бк/л), достигая многих сотен и тысяч Бк/л (например 51800 Бк/л в районе месторождения урана Обершлеме, Германия и в ряде других мест, в том числе в Сибири) и при дальнейшем изучении радиоактивности вод была, как отмечал В.И. Вернадский, необходимость определять природу радиоактивности: радоновая, радиевая или смешанная.

Разработка методов анализа вод на Ra позволила оценить, что его концентрация в водах находится на уровне 10–1⁶%, но в некоторых редких случаях в глубинных водах нефтегазоносных районов его концентрация

может достигать уровня 10–7%. Это было установлено в Ухтинском районе Республики Коми [2], затем на Челекене, Апшероне, позднее в Фергане и ряде других районов [3, 4, 8 и др.]. Открытие советских ученых столь богатых вод Ra поставило вопрос об извлечении этого чрезвычайно редкого и важного для государства элемента в промышленных масштабах (И.Я. Башилов, В.Г. Хлопин и др.). Была разработана и создана эффективная технология его извлечения в промышленных масштабах [8, 14]. Предполагается, что за весь период работы предприятия (с 1931 по 1956 гг.) было получено около 163–271 г. радий-мезоториевых препаратов, на долю последнего приходилось около 0,5 весовых %, в т.ч. в 1953 г. было получено 68 г., а в 1954–1956 гг. препаратов [8]. Добыча его была прекращена из-за появления техногенных радионуклидов высокой радиоактивности, которые могли полностью заменить потребность в радии.

После открытия явления индуцированного деления изотопа U^{235} под воздействием тепловых нейтронов (О. Ган, Г. Штрассман, 1938–1939 гг.) все внимание человечества было обращено на создание атомного оружия. Для этих целей ведущим странам Мира потребовалось большое количество урана. Приходилось вести чрезвычайно затратные поисковые работы. Использовали самые различные методы обнаружения радиоактивных руд. А одним из индикаторов возможного скопления больших масс урана в недрах были радиоактивные элементы в водах, в том числе Rn и Ra, как продукты распада U, так и сама концентрация урана в воде.

Это был новый толчок в развитии гидрогеохимического метода поисков полезных ископаемых. Справедливости ради следует отметить, что, по-видимому, впервые этот своеобразный вариант поисков ядерного сырья применили, судя по материалам книги Роберта Янга “Ярче тысячи солнц” (1961), специальные разведывательные группы армии США для обнаружения предприятий нацистской Германии, на которых шла разработка атомной бомбы.

Возникло новое направление в гидрогеологии – радиогидрогеология. Это отрасль гидрогеологии, занимающаяся изучением природных радиоактивных вод, условиями их формирования и распространения, выяснением их роли [24].

Изучение ураноносности природных вод в 1947–1955 гг., проведенное под руководством И.Е. Старика, а затем Д.С. Николаева [27], охватило практически все крупнейшие реки и другие водоемы СССР и дало материал для установления основных закономерностей миграции урана в водной среде и ее зависимости от характера процессов выветривания горных пород и климатической зональности, гидрогеохимических факторов.

Наиболее обстоятельно все эти данные приведены в монографии А.Н. Токарева и В.А. Щербаква “Радиогидрогеология” (1956) и в крупном обобщении А.И. Германова и др., опубликованном в фундаментальной книге “Основные черты геохимии урана” в 1963 г., удостоенной в свое время Ленинской премии [13].

Содержание урана в различных типах природных вод в зависимости от их минерализации приведено на

(рис. 1). Его анализ позволил А.И. Германову сделать обобщения глобального характера.

Содержание урана в морской воде, по данным разных исследователей [13, 26, 43 и др.], колеблется в достаточно узких пределах (0,3–3,70) 10–6 г/л. На фоне относительно ровного распределения солей в морской воде обнаруживается неравномерность распределения в ней урана как по латерали, так и по вертикали. Причем, это наблюдается не только во внутриконтинентальных морях и заливах, но и в океанах вдали от суши [13].

Вблизи континентов различия в содержании урана, как и других компонентов, вызваны прежде всего влиянием речного стока, в особенности многоводных рек. Изменения концентрации урана в вертикальном разрезе морей и океанов, может быть обусловлено морскими течениями, несущими воды. Это фактор сказывается во всей гидросфере не только в неравномерном распределении температуры и минерализации воды, но и содержания кислорода, фосфора, азота и других компонентов, в том числе живого вещества, например, планктона.

Кроме того, изменения содержания урана в морях и океанах в вертикальном и горизонтальном направлениях обусловлены неравномерностью развития процессов осаждения его (восстановления, сорбции взвесью, по-

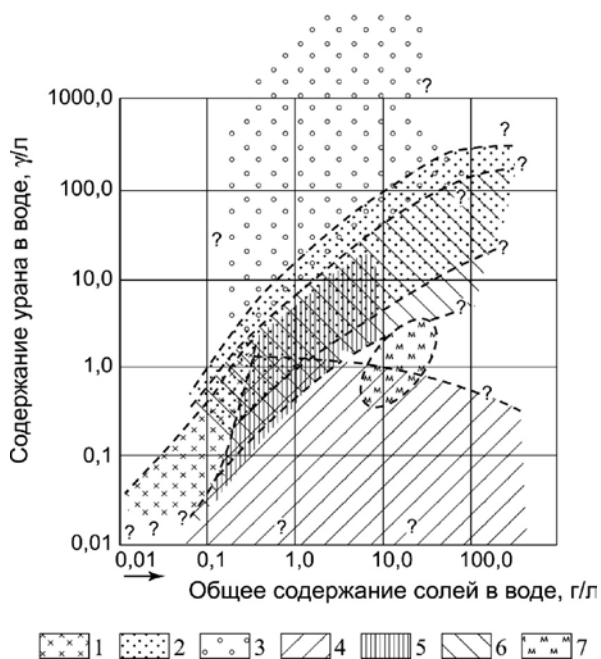


Рис. 1. Схема взаимосвязи между общей минерализацией и содержанием урана для различных типов природных вод по А.И. Германову [13]: 1 – атмосферные осадки; 2 – грунтовые воды вне участков выщелачивания ранее накопленных в породах каменной соли, гипса и других водорастворимых солей; 3 – воды урановых месторождений в окислительной обстановке; 4 – подземные воды в восстановительной обстановке; 5 – речные воды; 6 – озерные воды; 7 – морские воды

глощения живыми существами и т.п.) и противоположного ему процесса, включая растворение взвешенных минеральных частиц и продуктов жизни, повсеместно присутствующих в море. В водоемах, не имеющих связи с мировым океаном, в регионах с дефицитом атмосферных осадков наблюдаются повышенные содержания урана, например, в Каспийском море ($3-10 \cdot 10^{-6}$ г/л. Иногда в аридных областях оно достигает $n \cdot 10^{-5}$ г/л (Аральское море и др.).

Ресурсы урана в Мировом океане составляют миллиарды тонн и поэтому не случайно этот природный резервуар рассматривается рядом ученых как источник урана будущего [15, 16, 34, 40 и др.]. Технологические подходы к его извлечению активно разрабатываются и апробируются в полупромышленных масштабах.

Распределение урана в *озерных водах* чрезвычайно неравномерное (И.Е. Старик, Д.С. Николаев, С.Г. Цейтлин, Н.Х. Айдиньян и др.) и во многом определяется климатической зональностью. Содержание его варьирует от $3 \cdot 10^{-8}$ до $n \cdot 10^{-4}$ г/л. Наиболее низкие концентрации урана наблюдаются в проточных высокогорных озерах, а также в озерах северных широт. И те, и другие отличаются также очень низкой общей минерализацией воды. В ряде озер Монголии (Шаазгай-Нуур и др.) Средней Азии (оз. Сыссыкуль), Турции (оз. Ван) содержание урана приближается к минимально промышленным концентрациям [33 и др.].

В реках содержание растворенного урана также изменяется в большом диапазоне. По имеющимся данным [13 и др.] оно обычно изменяется от $3 \cdot 10^{-8}$ до $n \cdot 10^{-5}$ г/л. На содержание урана в речных водах большое влияние оказывают климатические условия; зависимость его от климатической зональности (горизонтальной и горной) особенно ярко проявляется на примере малых рек, которые в каждой почвенно-климатической зоне характеризуются своим содержанием растворенного урана в воде и своеобразным химическим составом. По мере продвижения от гумидных к аридным регионам наблюдается рост содержания в речных водах урана и их общей минерализации. Аналогичное влияние на поведение урана в реках оказывает и горно-климатическая зональность.

Практически всегда наблюдается обогащение ураном вод малых рек, бассейн питания которых расположен в полях развития пород, обогащенных ураном или расположения урановых или урансодержащих проявлений.

Указанное обогащение речных вод ураном, а также некоторыми другими сопутствующими ему элементами спутниками (Mo, Pb и др.), используется в гидрогеохимическом методе поисков урановых месторождений. Гидрогеохимический метод прогнозирования и поисков урановых месторождений является обязательным рекомендованным методом в комплексе специализированных геологоразведочных работ.

В 80-е гг. XX в. на значительной части страны по линии Первого Главного Управления Министерства Геологии СССР реализовывалась программа по изучению стока малых рек, предназначенная прежде всего для выявления ураноносных площадей. К сожалению, результа-

ты этих работ были секретными и являются малоизвестными.

Распределение урана в *водах атмосферы*, как отмечает А.И. Германов [13] изучено слабо. Имеется ограниченное количество определений его в дождевых водах и снеге, причем все пробы собраны на суше. Данные о содержании урана в атмосферных осадках открытых морей отсутствуют.

Концентрация урана в дождевой воде или снеге над континентами так же, как и общая минерализация этих осадков (если исключить хлориды), зависит от региональных климатических условий, которые вызывают различия в поступлении в атмосферу не только паров воды, но и частиц пыли. Последние и являются основным поставщиком растворенного урана в атмосферные осадки.

Исследователями отмечено, что в зонах влияния горных атмосферных осадки резко обогащены ураном. Так, например, в окрестностях промышленных центров в гумидном климате отмечаются повышенные содержания урана, достигающие (1–2) 10^{-6} г/л. Это подтверждается и информацией, приведенной на рисунке 2 для снеготалой воды континентальных горных ледников Алтая и ледников Гренландии.

Содержание урана в *подземных водах*, по мнению А.И. Германова, варьирует от $1 \cdot 10^{-8}$ до 2 г/л (в кислых рудничных водах) [13].

Уран подземных вод, как известно, имеет сложное происхождение. Главным источником его поступления в подземные воды зоны активного водообмена обычно являются горные породы и на ограниченных участках – урановая рудная минерализация. Кроме того, он поступает с атмосферными осадками, а на отдельных площадях – с инфильтрующимися речными, ледниковыми или сточными водами. В водах морских, озерных и речных осадочных или осадочно-вулканогенных образований, возникших в окислительных условиях, возможно присутствие в растворе урана, поступившего из гидросферы в период седиментации. Кроме того, не исключено проникновение его в подземные воды различных пород из трансгрессирующих водных бассейнов.

Распределение урана в подземных водах так же, как и других растворенных в них компонентов, подчинено определенным закономерностям. Зональное распределение окислительно-восстановительных условий, являющееся в значительной степени результатом зонального развития микробиологических процессов, определяет соответственно и зональность развития ряда геохимических процессов. Оно влияет на поведение в подземной гидросфере многих элементов, особенно тех, которые меняют свою валентность в указанном интервале Eh (от +600 до –400 мВ).

Растворенный в природных водах урана, как и многие другие компоненты, находится в общем круговороте вод планеты. Расчет показывает, что в гидросфере (включая подземную гидросферу) и в атмосфере в непрерывной относительно быстрой миграции находятся значительные количества растворенного урана, которые намного превышают запасы всех известных месторождений мира. Главным «хранилищем» его, как и многих

других растворенных компонентов, является океан, в котором заключено не менее 98% растворенного урана гидросферы – около 2–4 млрд г. Второе место занимают подземные воды [13].

Наиболее быстро обновляется уран атмосферы и рек, поскольку атмосферная влага меняется в среднем каждые 9 суток, а речные воды – за 10 суток [5]. Но даже и в океане обновление находящегося в растворе урана совершается геологически очень быстро, примерно 1600 лет, вследствие поступления урана с речными, атмосферными и подземными водами, растворения в мор-

ской воде взвешенных частиц, а также привноса его с континентальными льдами.

В районах техногенной трансформации гидросферы в водах начинают фиксироваться повышенные концентрации урана. Так, в системе бассейна р. Чу, в результате добычи и переработки урановых руд, сформировалось значительное количество хвостохранилищ, из которых идет дренаж в подземные и поверхностные воды гидросферы. Концентрация U в реке Карабалта достигает 29,4 мг/л, а в реке Чу она составляет 15 мг/л. В.А. Зуев [7] отмечал, что фоновая концентрация U в по-

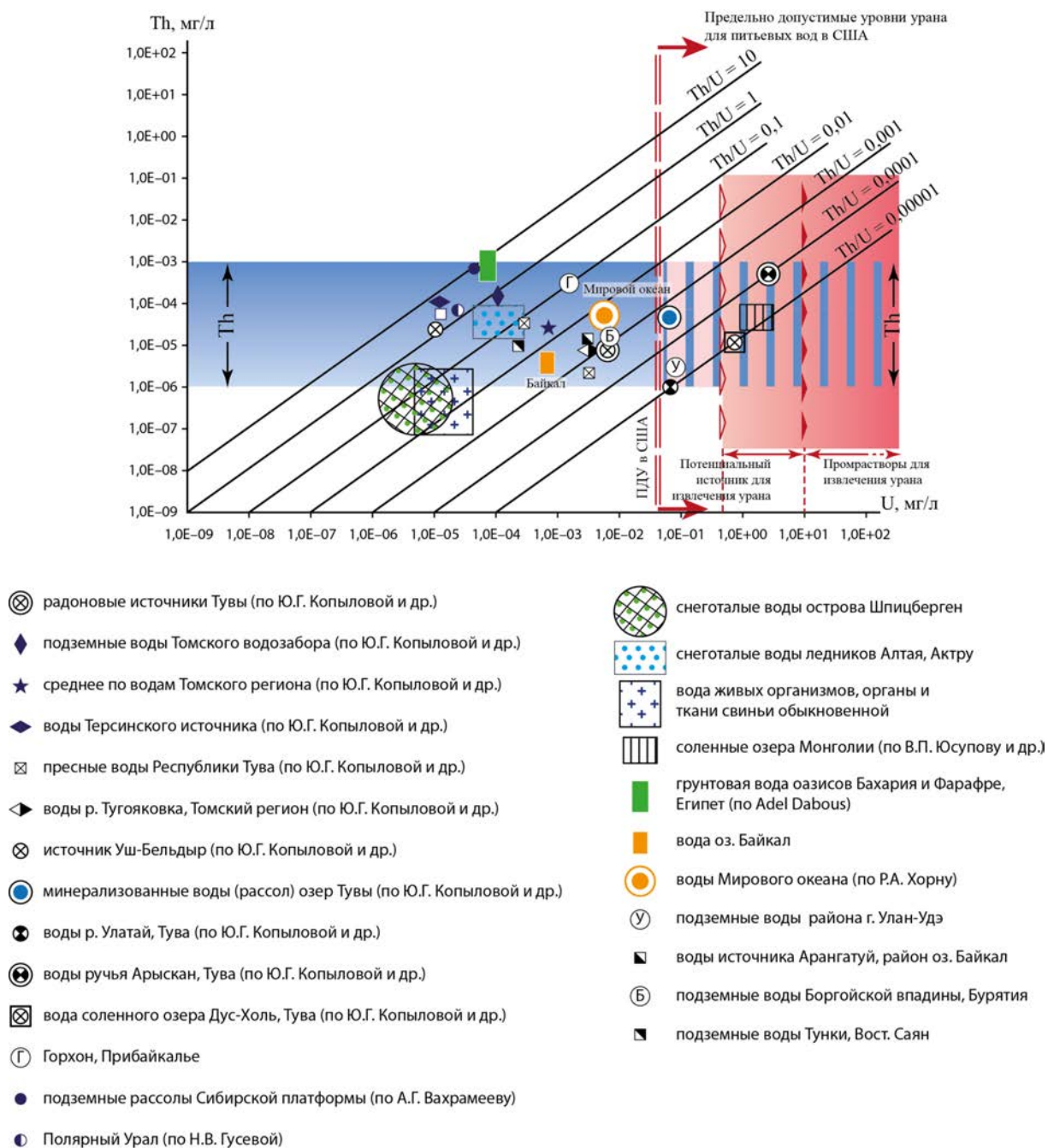


Рис. 2. Радиогеохимическая типизация вод гидросферы

верхностных и подземных водах Западной Сибири, соответственно, составляет 0,01–0,12 и 0,03–0,2 мкг/л, тогда как в зоне влияния Сибирского химического комбината этот показатель уже находится на уровне 1–30 мкг/л. При этом, картируется достаточно устойчивая зона повышенных его концентраций, совпадающая с зоной аномальных концентраций в воде F, I, He и ряда других элементов [7, 20], что свидетельствует о единстве источников их поступления в гидросферу.

К сожалению, в литературе практически отсутствует информация по геохимическим особенностям, в том числе по радиоактивным элементам, воды живых организмов. Встречаются данные по содержанию урана в моче, главным компонентом которой является вода. Его концентрация в ней оценивается на среднем медианном уровне 0,007 мкг/л, при разбросе от менее предела обнаружения до 0,46 мкг/л [39]. Имеется единичная информация по содержанию этого элемента в крови человека [41], в которой вода также играет ведущую роль. Содержание урана в этой субстанции колеблется по средним показателям от 0,48–0,73 мкг/л у мужчин и до 0,53–0,93 мкг/л у женщин.

К моменту написания данной статьи, нами были получены первые данные о содержании урана и тория в воде (анализы выполнены методом ICP-MS в лаборатории НОЦ НИ ТПУ "Вода", выделенной при нагревании на водяной бане, из органов и тканей организма свиньи (*Sus scrofa domestica*). Эти результаты показаны на общей классификационной радиогеохимической диаграмме (рис. 2).

Начиная с конца XX века в геохимической литературе появляются данные, по одновременной оценке, содержания U и Th в водах. Это стало возможным благодаря массовому внедрению в аналитическую практику метода индуктивно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием (ICP-MS).

Так, в обобщающей работе С.Л. Шварцева [31] приводятся сводные данные по абсолютным содержаниям этих элементов в воде. Рассчитанные по этим данным С.И. Арбузовым показатели торо-уранового отношения, как важному геохимическому индикатору для родственных химических элементов, судьба которых близка в эндогенных магматических и высокотемпературных флюидных процессах (они оба в этом случае 4-валентные с близкими ионными радиусами) и абсолютно различна в водной среде в экзогенных условиях (валентность Th и его ионный радиус остаются без изменения, тогда как U становится 6-валентным и образует уранил-ионный комплекс. Растворимость в воде при этом становится различной на порядки. Анализ приводимых табличных данных показывает, что в большинстве случаев содержание U в различных типах вод значительно выше таковой чем приводимая для Th [31]. Но отмечаются некоторые воды, в которых тория больше урана. Со ссылкой на Livingston и Turekian им указывается, что Th в речных водах больше чем U в 2,5 раза, но эта информация требует проверки, т.к. современные оценки говорят об обратном, хотя в некоторых случаях таковое наблюдается. Это с точки зрения ранее существующих взглядов (В.И. Вернадский и др.) является геохимичес-

ким нонсенсом. В 2013 г. Ю.Г.Копылова в докладе на IV международной конференции по радиоактивности в Томске привела ряд водных источников в Туве, в которых Th было больше чем урана [9].

Это подвинуло автора данной статьи провести анализ полученных современных данных по радиогеохимическим особенностям вод гидросферы. Доступные ему обобщенные данные, полученные методом ICP-MS, представлены на (рис. 2).

Следует отметить, что попытки определить содержание Th в водах предпринимались и ранее. Об этом можно судить по результатам работ первой радиологической лаборатории, созданной Е.С. Бурксером в 1910 г. в Одессе [5], а также по ряду других публикаций [29].

В.В.Чердынцев [29] обратил внимание на высокую активность продуктов распада Th^{232} в водах редкометалльного месторождения и на нарушение нормальных соотношений между изотопами урана и тория, со сдвигом в сторону изотопов тория. При этом, он указал на чрезвычайно высокие аномальные концентрации Th в воде на уровне 4–9 г/л. К сожалению, проверить и повторить эти изменения не представляется возможным, но иметь в виду, что такие результаты могут повториться, следует.

В связи с этим следует отметить, что нами в 2012 г. зафиксирована ториевая природа аномалии в районе травертиновой постройки, образующейся на устье самоизливающейся скважины Г-1 [22]. Мощность экспозиционной дозы в районе источника 0,46 мкЗ/ч и этот показатель имеет пульсирующий характер. Радиоактивность обусловлена продуктами распада тория: торием и другими дочерними изотопами. Концентрация Th в воде этого источника, по данным С.В. Алексеева (устное сообщение) выше, чем таковое для урана.

Этот ториевый тип источника требует специального комплексного изучения. Следует отметить, что именно в этом источнике группа академика Г.Н.Флерова вела поиски трансурановых элементов и она установила там присутствие неизвестного изотопа радиоактивного элемента [25].

Анализ имеющегося материала позволяет оценить реальные разбросы в концентрациях главных естественных радиоактивных элементов в водах гидросферы, оцененных одним и тем же аналитическим методом.

Сегодня можно утверждать, что разброс частных значений содержания тория находится в пределах четырех порядков (10^{-4} – 10^{-7} мг/л), тогда как для урана диапазон его содержаний превышает 8 порядков (от $<10^{-6}$ до $>10^2$ мг/л).

Отношение Th к U (Th / U) в водах гидросферы колеблется от 0,0001 до 10 и более. В терминах радиогеохимии [21] можно сказать, что природа радиоактивности воды колеблется от урановой (Th/U < 1), смешанной торий урановой до ториевой (Th/U > 5). Величина этого показателя для вод Мирового Океана, на долю которой приходится 98% вод гидросферы, в среднем составляет 0,008, для главного по запасам пресной воды озера Байкал данная величина в среднем составляет 0,007.

Из анализа рисунка 2 хорошо видно, что снеготалая вода континентальных горных ледников (ледник Актру,

Алтай) практически на порядок и более отличается по радиогеохимическим особенностям от таковой, но характеризующие ледники Гренландии, хотя по соотношению Th к U они достаточно близки (0,02–0,5)

Ториевой природой радиоактивности обладают, как правило, но далеко не всегда, минерализованные подземные источники (Аршан, В. Саян; Уш-Бельдыр, Тува и др.)

Так, Ю.Г. Копылова с коллегами [9] отмечают, что в пресных азотных термальных щелочных водах родника Уш-Бельдыр концентрации урана сопоставимы с концентрациями тория, составляют около 10^{-5} мг/л, что и определяет целые значения торий-уранового отношения.

В подземных водах также отмечается рост содержания урана с повышением минерализации вод при относительно постоянном уровне концентраций тория в водах. За редким исключением торий-урановое отношение составляет тысячные доли. Увеличение его до сотых значений, к примеру, в роднике Борзун-Хол и в теплых углекислых радоновых источниках Аржаана Чойган, связано с понижением концентраций урана.

Данные сотрудников Лимнологического института СО РАН (аналитик Е.И. Воднева, Иркутск, 2010) в ряде термальных источников Забайкалья при достаточно низком уровне содержания U и Th, в 80% проб фиксируется Th/U от 1 до 3.

Наши данные показывают, что термальные источники также имеют ториевую природу радиоактивности. Например, источник на территории Баргузинского заповедника имеет Th/U = 9,3 (по материалам Д. Галушкиной).

Целые значения торий-уранового отношения получены ими также в холодных углекислых соленых водах Терсинского месторождения минеральных вод Кузнецкого Алатау, которое определяется нижефоновыми кон-

центрациями урана – сотысячные доли мг/л, сопоставимыми с обнаруженными здесь концентрациями тория.

Низкими показателями Th/U (<0,001), как правило, характеризуются пресные воды, формирующиеся в геологических структурах, в пределах которых известны или имеются предпосылки по выявлению урановых месторождений (Боргойская впадина, мелкие впадины в районе города Улан-Удэ, участки Арыскан, Улаятай и др.), а также сильно минерализованные, иногда до состояния рапы, воды озер Тувы, Монголии и др. районов. Воды некоторых из них могут считаться специфическим гидроминеральным ресурсом на уран.

Наилучшие условия для накопления урана и тория в водах среди рассмотренных источников в Туве отмечаются в холодных слабокислых радоновых углекислых соленых водах родника Арыскан, где, благодаря наличию зон уникальной уран-торий-редкоземельной минерализации, концентрации урана в водах достигают 1,23 мг/л (близко к минимально промышленно значимой концентрации для гидрометаллургии – 10 мг/л), а тория – 0,00052 мг/л, что характеризует экстремальные значения этих элементов в водах региона. В этом источнике следует внимательно исследовать U и редкоземельные элементы для понимания геохимических процессов в гидросфере.

Требуется объяснения ториевая природа радиоактивности рассолов Сибирской платформы в эвапоритовых толщах Сибирской платформы (А.Г. Вахромеев и др.), а также в некоторых типов вод зоны многолетней мерзлоты (Л.П. Алексеева), поверхностных вод ряда районов Полярного Урала (Н.В. Гусева), Китая (Е.А. Солдатова) и др.

Небезынтересно отметить, что по величине Th/U вода живых организмов также дифференцируется и ко-

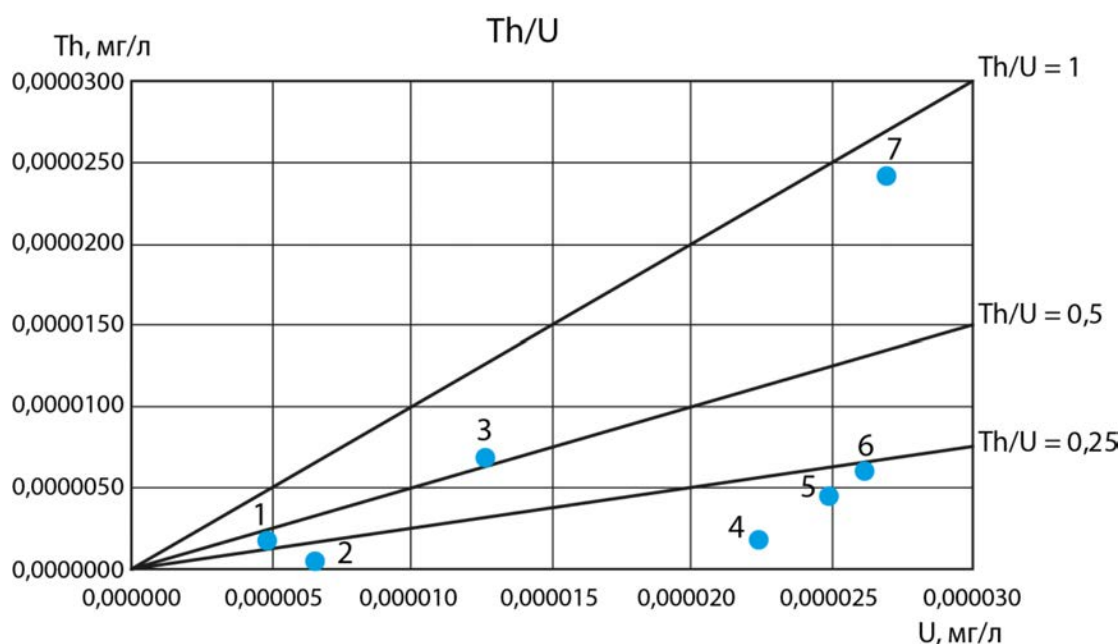


Рис. 3. Радиогеохимическая типизация воды, выделенной из органов и тканей свиньи (*Suscrofa domestica*): 1 – печень; 2 – мышцы; 3 – легкое; 4 – почка; 5 – подкожный жир; 6 – кровь; 7 – селезенка

леблется от 0,08 до 0,9, достигая своего максимума в воде из селезенки (рис. 3).

Вероятной причиной преобладания тория над ураном в водах может быть различные формы их нахождения в данном растворе. Общеизвестно, что элементы, в том числе и радиоактивные, могут находиться в различных формах: взвешенные, коллоидно-дисперсные системы различных размеров, истинно растворенные, в том числе комплексные и металлорганические соединения. Но это возможно установить только методом последовательного фильтрования, использования различных методов ультрафильтрации и других приемов разделения. Таких данных пока недостаточно. Следует отметить, что на рисунке 2 представлены данные анализа природной воды, пропущенной через фильтр 0,45 мк, т.е. предполагается, что взвешенная фаза отделена.

Об этом, косвенно, могут свидетельствовать данные Л.В. Замана и др. [6], которые, изучая геохимию дренажных вод Забайкалья, установили, что в ряде случаев в водах хвостохранилища и ее выходе ниже дамбы содержание Th достигает 0,112–0,943 мг/л (112–943 мкг/л), при содержании урана 0,032–0,053 мг/л и величине Th/U от 2,9 до 2,5 [6]. Данные воды характеризуются низким pH (3,16–3,04), высоким Eh(461,512) и общей минерализацией при высоком содержании CO₂, Si, Al и ряда других компонентов. Тогда как, воды озера в отработанном карьере и водоотводной канаве из штольни, в которых pH более высокий (5,3–5,8), Eh и минерализация более низкие, содержания Th составляет 0,025–0,52 мкг/л, урана 0,28–1,06 мкг/л и, соответственно, величина Th/U находится на уровне 0,49 до 0,09 [6].

Следует остановиться на санитарно-гигиенической оценке качества питьевых вод по этим параметрам. Уран и его соединения отличаются высокой токсичностью. В организме человека уран действует на все органы, являясь общеклеточным ядом. Молекулярный механизм действия урана связан с его способностью подавлять активность ферментов.

В питьевых водах уран нормируется по химической токсичности. В России ПДК урана в питьевых водах принят равным 15 мкг/л (ГН 2.1.5.2280-07 дополнение к изменениям 1 к ГН 2.1.5.1315-03), в Соединенных Штатах Америки равным 30 мкг/л, Всемирная организация здравоохранения рекомендует норматив 15 мкг/л. И, как видно из рисунка 2, часть вод не соответствует нормативным требованиям.

Показатели радиоактивности воды нормируются по суммарной альфа-активности и по этому показателю многие питьевые воды не соответствуют нормативу.

Выражаю глубокую признательность сотрудникам научно-образовательного центра “Вода” НИ ТПУ Ю.Г. Копыловой, Н.В. Гусевой, А. Хвощевской, Е.А. Солдатовой, М.П. Колпаковой, а также Л.В. Замане, Л.П. и С.В. Алексеевым, А.Г. Вахромееву, В.Е. Кац за любезное предоставление аналитических данных по изучаемым им водам Урала, Сибири, Тувы, Якутии, Забайкалья и др. районам. Автор благодарит С.И. Арбузова, Б.Р. Соктоева за обсуждение отдельных геохимических вопросов обсуждаемой проблемы, а также представителя компании А. Елисееву – за помощь в поиске информации по анализам воды

живых организмов, выполненных методом ICP-MS. Благодарит В.В. Жукова и Е.В. Перегудину – за помощь в техническом оформлении рисунков и текста статьи.

Высказываю глубокую признательность Н.П. Карагод, Н.В. Барановской, М. Скрипник и другим за помощь в подготовке проб воды из живого организма, а аналитическому центру “Вода” ТПУ (Ю.Г. Копыловой, А. Хвощевской и др.) за ее оперативный анализ.

Литература

1. Багашев И.А. Радиоактивность источников Забайкалья // Сборник в честь двадцатипятилетия научной деятельности Владимира Ивановича Вернадского. – М., 1914. – С. 29–41.
2. Богоявленский Л.Н. Ухтинское месторождение радия // ДАН СССР. Сер. А. – 1928. – №14/15.
3. Вернадский В.И. Труды по радиогеологии. – М.: Наука, 1997. – 319 с.
4. Вернадский В.И., Хлопин В.Г. Об исследованиях на радий нефтяных месторождений Союза // Доклады АН СССР, серия А. – 1932. – № 3.
5. Зайцева Л.Л. Первая радиологическая лаборатория в России // Труды Института истории естествознания и техники. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С. 197–218.
6. Замана Л.В., Чечель Л.П. Геохимия дренажных вод горнорудных объектов вольфрамового месторождения Бом-Горхон (Забайкалье) // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – [Vol.] 22. – С. 1–7.
7. Зуев В.А. Уран в природных водах Западной Сибири: геохимия и техногенез // Материалы I Международной конференции “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. – Томск: Изд-во ТПУ, 1996. – С.120–123.
8. Кичигин А.И. Радиоактивное загрязнение территории Ухтинского радиевого промысла (1931–1956 гг.) // Материалы III Международной конференции “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. – Томск: STT, 2009.
9. Распространенность урана и тория в природных водах Тувы / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, Ч.К. Ойдуп и др. // Материалы IV международной конференции “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. – Томск: STT, 2013. – С. 291–294.
10. Кузнецов В.Д. Радиоактивность источников курорта Белокуриха // Белокуриха. Сибирский радиоактивный курорт. – Новосибирск: Зап.-Сиб. краевое изд-во, 1935. – С. 12–21.
11. Наумов Г.Б., Рихванов Л.П. Роль В.И. Вернадского в становлении и развитии учений о радиоактивности и радиогеологии // Материалы IV международной конференции “Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека”. – Томск: STT, 2013. – С. 22–34.
12. Орлов П.П. К вопросу о радиоактивности сибирских минеральных вод // Изв. института исследований Сибири. – Томск, 1921. – С. 103–125.
13. Основные черты геохимии урана. – 2-е изд., стереотип., испр. – Томск: STT, 2013. – 374 с.
14. Погодин С.А., Либман М.П. Как добывали Советский радий. – М.: Атомиздат, 1977.

15. Извлечение урана из природных урансодержащих вод сложного солевого состава / З.А. Разыков и др. // Докл. АН Таджикистана. – 2002. – Т. 45, № 1–2.
16. Рихванов Л.П. Ресурсы урана будущего // Актуальные проблемы урановой промышленности (МНПК 2014) : сб. докл. 7 Международной научно-практической конференции, Алматы, 25–27 сентября 2014. – Алматы, 2014. – С. 11–16.
17. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека / Л.П. Рихванов и др. // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. – 2006. – №2(2). – С. 41–51.
18. Радиоактивные элементы в окружающей среде / Л.П. Рихванов и др. // Известия ТПУ. – 2007. – Т. 311, № 1. – С. 128–136.
19. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиозащиты. – Томск : СГТ, 2009. – 430 с.
20. Рихванов Л.П. Общие и региональные проблемы радиозащиты. – Томск : Изд-во ТПУ, 1997. – 384 с.
21. Смыслов В.В. Уран и торий в земной коре. – Л. : Недра, 1974. – 232 с.
22. Минералого-геохимические особенности травертинов современных континентальных гидротерм (скважина г-1, Тункинская впадина, Байкальская рифтовая зона) / Б.Р. Соктоев, Л.П. Рихванов, С.С. Ильенок и др. // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 4. – С. 370–388.
23. Титов В.С. Радиоактивная эманация в водах и газах терм деревни новая Белокуриха на Алтае. – Томск, 1913. – 48 с.
24. Токарев А.Н., Щербаков А.В. Радиогидрогеология. – М. : ГНТИ по геологии и охране недр, 1956.
25. Поиск сверхтяжелых элементов в термальных водах Байкальской рифтовой зоны / Г.Н. Флеров, С.Н. Дмитриев, И.С. Ломоносов и др. // Сообщ. Объедин. ин-та ядерных исслед. Рб_84_422. – Дубна, 1984.
26. Хорн Р.А. Химия океана. – М. : Мир, 1972. – 290 с.
27. Хвостова М.С. История изучения естественной и искусственной радиоактивности природных объектов России : автореф. дис. ... геол.-мин.наук. – М. : ИИЕУТ, 2006. – 24 с.
28. Хлопин В.Г. Радий и его получение из русского сырья // Труды по изучению радия и радиоактивных руд. – Л., 1924. – Т. 1.
29. Чердынцев В.В., Асылбеков У.Х.О содержании тория и других радиоэлементов в природных водах // Известия ВУЗов. Геол. и разведка. – 1958. – № 9. – С. 125–129.
30. Чехов В.П. Влияние радиоактивной воды курорта Белокуриха на растения // Белокуриха. Сибирский радиоактивный курорт. – Новосибирск : Зап.-Сиб. краевое изд-во, 1935. – С. 28
31. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М. : Недра, 1998. – 366 с.
32. Эмсли Дж. Элементы. – М. : Мир, 1991. – 132 с.
33. Ураноносность высокоминерализованных озер Северозапада Монголии / В.П. Юсупов и др. // ДАН. – 2011. – Т. 437, № 1.
34. Янг Р.Дж. Урановые месторождения мира (исключая Европу) // Геология, геохимия, минералогия и методы оценки месторождений урана. – М. : Мир, 1988.
35. Adel A. Dabous. The geochemistry of uranium and thorium isotopes in the Western Desert of Egypt // Geochimica et Cosmochimica Acta. – Vol. 58, No. 21. – P. 4591–4600.
36. Allegre C.V., Dupre B., Lewin E. Torium/uranium ratio of the earth // Chem. Geol. – 1986. – [Vol.] 56, No. 3–4. – P. 219–227.
37. Handbook of Geochemistry. Vol II/5/ Elements La (57) to U (92). – Berlin : Springer-Verlag, 1974.
38. Fisenbud M., Gesellt. Environmental Radioactivity from Natural, Industrials and Military Sources. – Academic Press, 1997. – 639 p.
39. Caldwell inductively coupled plasma mass spectrometry to measure multiple toxic elements in urine in NHANES 1999–2000 / L. Kathleen et al. // Atomic Spectroscopy. – 2005. – Vol. 26(1).
40. Klinkhammer G.P., Palmer M.R. Uranium in the oceans: Where it goes and Why? // Geochemical et Cosmochimica Acta. – 1991. – P. 55.
41. Nada F.T, Lamya T.A., Hussain A.A.-J. Uranium concentration measurements in human blood for some governorates in Iraq using CR-39 track detector // J Radioanal Nucl Chem. – 2012.
42. Jitaru P., Tirez K., De Brucker N. Panoramic analysis for monitoring trace metals in natural waters by ICP-MS // Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 24(1). – P. 1–10.
43. The Encyclopedia of Okeanography / Reinhold Publishing Corporation. – New York, 1966.