

УРАН И ТОРИЙ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ ЮГО-ВОСТОКА АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

Ю.Г. Копылова¹, Н.В. Гусева¹, К.Д. Аракчаа³, А.А. Хвашевская¹, И.С. Мазурова¹, О.Д. Аюнова²,
Ч.К. Ойдуп², К.М. Рычкова²

¹Томский политехнический университет, Томск, Россия, unrc_voda@mail.ru

²Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл, Россия,
giatran@yandex.ru

³ГБУ "Научно-исследовательский институт медико-социальных проблем и управления Республики Тыва
(НИИ МСПУ РТ), г. Кызыл, Россия, chodura@yandex.ru

URANIUM AND THORIUM IN THE NATURAL WATERS OF THE SOUTH-EAST OF THE ALTAI-SAYAN REGION

Yu.G. Kopylova¹, N.V. Guseva¹, K.D. Arakchaa³, A.A. Khvashchevskaya¹, I.S. Mazurova¹,
O.D. Ayunova², Ch.K. Oidup², K.M. Rychkova²

¹Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

²Tuvan Institute of Complex Development of Natural Resources SB RAS, Kyzyl, Russia

³Research Institute of Medical and Social problems and Management of Tuva, Kyzyl, Russia

Исследована распространенность тория и урана в природных водах разного состава и минерализации юго-восточной части Алтай-Саянской области (поверхностные водотоки и водоемы, подземные холодные воды (пресные, солоноватые, углекислые) и термальные (азотно-углекислые и азотные)). Выявлена зависимость увеличения урана в водах с повышением минерализации холодных вод и его снижения в термальных водах. Наибольшие концентрации урана (до 1,2 мг/л) и тория (до 0,00052 мг/л) встречены в углекислых холодных водах, особенно, на участках редкоземельного оруденения Восточных Саян. Показано, что только в термальных водах восстановительных геохимических сред, неблагоприятных для накопления урана в водах, торий иногда превышает концентрации урана. В холодных водах целые значения торий – уранового отношения появляются при малых концентрациях урана и сохраняющихся концентрациях тория на уровне десятичных значений, что согласуется с повышением в этих водах иттрия и редкоземельных элементов.

Occurrence of U and Th is studied in the natural water of different chemical composition and TDS values of the south-east of the Altai-Sayan region. Surface water, cold groundwater (fresh, saline and carbon dioxide water) and thermal groundwater (nitric-carbon dioxide and nitric water) are investigated. It was found that the increase of TDS values in the cold water is followed by the rise of U concentrations while in the thermal water the decrease of the U content is observed. The highest U concentrations (up to 1,2 mg/L) and Th concentrations (up to 0,00052 mg/L) are found in the carbon dioxide cold water, especially, in the areas of rare earth mineralization of the East Sayan. It is shown that only in the thermal water with reduction conditions, which are unfavorable for uranium accumulation, the concentrations of Th sometimes exceed the U concentrations. In the cold water integer values of the Th/U coefficient are observed under small uranium concentrations and thorium concentrations at the level of tenth of $\mu\text{g/L}$, which is consistent with the increase of yttrium and rare earth elements in this water.

В.И. Вернадский, отмечая "всюдность" присутствия урана и тория и постоянство соотношения Th/U в продуктах магматических процессов, подчеркивает высокую степень подвижности урана в водных растворах и инертность тория, концентрации которого в земных условиях должны быть ничтожными, и замечает, что "по мере приближения к биосфере наблюдается ясный процесс разделения урана от тория" [2]. Такое разделение урана и тория обусловлено, прежде всего, миграционной способностью их соединений в условиях земной коры, определяемой внутренними свойствами этих элементов, благодаря чему в водах зоны гипергенеза чаще всего наблюдается преобладание концентраций урана над концентрациями тория. При этом информация о соотношениях урана и тория в горных породах и водах, полученная различными авторами [1], позволяет считать, что в зоне гипергенеза происходит накопление урана в водах, а тория – в донных осадках. Торий как элемент – гидролизат не склонен накапливаться в водах под воздействием экзогенных процессов разрушения алюмосиликатных пород, а стремится к образованию гид-

роокислов и осаждению с вторичной фазой в условиях окислительной среды.

Ограниченность сведений о характере взаимоотношений этих элементов в природных водах долгое время существовала из-за отсутствия достоверных и доступных методов анализа вод. До недавнего времени основную информацию при совместном определении урана и тория получали с использованием нейтронно-активационного анализа [6]. В последние годы благодаря внедрению в практику аналитических работ методов масс-спектрометрии значительно расширились возможности по определению этих элементов в водах и изучению их соотношений. Вместе с тем, остаются проблемными вопросы об уровнях концентраций урана и тория в водах разного состава [1]. Отправным моментом для оценки распространенности этих элементов в водах являются сведения об их концентрациях в морской воде, являющейся геохимической константой планеты. Так, по данным [1] при солености 35‰ концентрации урана составляют 3,3·10⁻⁷% (3,3·10⁻³ мг/л), а средние концентрации тория в морской воде по данным Е.В. Гуревича с соавторами и В.А. Ветрова [1] оцениваются как 1·10⁻⁴ мкг/л

(0,0000001 мг/л). При этом разброс частных значений тория находится в пределах четырех порядков, а диапазон содержаний по урану превышает восемь порядков [1]. Торий-урановое отношение, рассчитанное по кларкам гидросферы [5], в морских водах составляет 0,00003, а в речных водах увеличивается до 0,2. Выполненные исследования по одновременной оценке содержаний U и Th в водах Тувы [3] показали сложную картину соотношений указанных радиоактивных элементов в обследованных водах, значения которых изменяются от десяти тысячных до целых значений, что позволяет провести радиогеохимическую типизацию вод гидросферы, впервые представленную в [докладе Л.П. Рихванова на конференции, посвященной 85 лет кафедре ГИГЭ и опубликованной в настоящем сборнике статей для конференции по радиоактивности, 2016].

Приведенные обстоятельства определяют актуальность исследований распространенности урана и тория в природных водах различного состава и минерализации с использованием метода масс-спектрометрии и объяснения характера изменения в них торий-уранового соотношения.

Полевые гидрогеохимические исследования выполнялись в 2013–2016 гг. полевыми отрядами Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН и ООО “Лаборатория архаологии и туризма” (г. Кызыл) и научно-образовательного центра Вода Института природных ресурсов Томского политехнического университета. Опробование природных вод проводилось на всей территории Тувинского региона. Объекты опробования представлены 8 водотоками, 19 озерами и 96 родниками пресных вод, 18 родниками солоноватых, соленых вод и рассолов, 34 родника пресных азотных терм природных комплексов Уш Белдир, Тарыс и Тункинской долины, 16 родников термальных углекислых вод Тункинской долины и природного комплекса Чойган и 19 родников холодных солоноватых вод Чойган, Тункинской долины и Восточных Саян в северо-восточной части Тувы. Количественный химический состав природных вод выполнен в Проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии научно-образовательного центра “Вода” Института природных ресурсов Томского политехнического университета. Масс-спектральное определение микрокомпонентов, в том числе редкоземельных и радиоактивных элементов выполнено Т.Н. Табатчиковой и И.С. Мазуровой. Основная часть аналитических работ в 2013–2016 гг. выполнена методом масс-спектрометрии на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой NexION 300D (Perkin Elmer, США). Одним из преимуществ метода является широкий диапазон определяемых концентраций: линейность калибровочного графика составляет более девяти порядков по урану и торию. Для консервации проб и приготовления калибровочных растворов использовалась азотная кислота, очищенная с использованием системы очистки Distill asid BSB-939-IR (Berghof, Германия). В качестве калибровочных растворов использованы мультиэлементные стандартные образцы (Perkin Elmer, США) №2 (Th, редкоземельные, скандий и др.), №3 (U и порядка 30 химических элемен-

тов-Cu, Zn, V и др.). Определение тория проведено по изотопу ^{232}Th , а урана – по изотопу ^{238}U . Низкие пределы обнаружения тория и урана в воде достигаются благодаря отсутствию полиатомных и изобарных наложений и составляют 10^{-7} мг/л.

Для проверки чистоты посуды, фильтров и реактивов в каждой партии проб используются 3–5 холостых образца, прошедших все стадии подготовки проб к измерениям (фильтрация, консервация, добавка внутреннего стандарта и др.). В процессе масс-спектральных измерений партии образцов проводился неоднократный контроль стабильности градуировочного графика по калибровочному раствору, содержащему 20 мкг/дм³ U и Th. Для учета матричного влияния в качестве внутреннего стандарта использовались Bi или In с концентрацией 5–10 мкг/л. После каждого измерения проводилась отмывка системы ввода 1–2% раствором азотной кислоты в течение 0,5–1 мин и последующее измерение холостой пробы для проверки степени очистки системы ввода по определяемым элементам. При анализе вод высокой минерализации пробу воды разбавляют до 1000 мг/л, хотя при этом происходит соответствующее увеличение и предела обнаружения элементов в такое же количество раз.

При обсуждении полученных данных проведена их систематизация по условиям формирования состава воды, их химических типов, кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных свойств и минерализации. Распространенность урана и тория в водах и значения торий-уранового отношения представлены в таблицах и дана их характеристика в тексте.

В поверхностных водах водотоков Тувы в ультра пресных нейтральных водах, подверженных континентальному засолению, со значениями отношений $\text{SO}_4/\text{Cl} > 1$ и $\text{Cl}/\text{Na} > 1$ (р.р. Тыва-Кешиг, Хемчик, Ак, Карасуг) с минерализацией 80–211 мг/л средние арифметические концентрации тория составляют $1,3 \cdot 10^{-5}$ мг/л, урана 0,00026 мг/л, а Th/U отношение в водах изменяется в от 0,02 до 0,1. В водах рек на участках потенциального оруденения или подверженных воздействию горно-рудных предприятий (р.р. Алдыы Ишкин, Торгалык, Барлык, Улаатай, Ирыйтей, Хандагайты мост, Чоза) нейтральных и слабощелочных окислительной обстановки с минерализацией от 17 до 399 мг/л и содержанием сульфат-иона от 11 до 72 мг/л при фоновых значениях хлор-иона (0,8–4,4 мг/л) концентрации тория составляют в среднем $4,2 \cdot 10^{-6}$ мг/л, а концентрации урана увеличиваются и составляют от 0,000196 до 0,00467 мг/л (при средних значениях 0,00197 мг/л), что определяет снижение значений торий-уранового отношения от 0,02 до $9,6 \cdot 10^{-5}$ и уменьшение его средних значений до 0,01. По данным распространенности тория и урана в общей небольшой выборке опробования малых водотоков (табл. 1) средние арифметические концентрации тория составляют $4,5 \cdot 10^{-6}$ мг/л, а урана – 0,0008 мг/л, т.е. более чем на два порядка концентрации урана превышают концентрации тория в малых водотоках Тувы и средние значения торий-уранового отношения равны 0,006.

В поверхностных водах озер создаются благоприятные условия для накопления урана, особенно с увели-

Таблица 1. Распространенность урана и тория в поверхностных водотоках Тувы

pH	Мин., мг/л	Параметры	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
7,24	172	Медиана	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$6,08 \cdot 10^{-3}$
		Минимум	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$9,63 \cdot 10^{-5}$
		Максимум	$1,86 \cdot 10^{-5}$	$4,67 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$
		Число точек	8	8	8

Таблица 2. Распространенность урана и тория в озерах Тувы

pH	Мин., мг/л	Параметры	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
8,51	77672	Медиана	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$2,85 \cdot 10^{-4}$
		Минимум	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$4,46 \cdot 10^{-4}$	$2,12 \cdot 10^{-5}$
		Максимум	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$5,17 \cdot 10^{-1}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$
		Число точек	19	19	19

Таблица 3. Распространенность урана и тория в пресных водах родников горного обрамления Тувинского прогиба

pH	Мин., мг/л	Параметры	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
7,53	403	Медиана	$2,16 \cdot 10^{-6}$	$3,15 \cdot 10^{-3}$	$6,89 \cdot 10^{-4}$
		Минимум	$9,13 \cdot 10^{-8}$	$5,46 \cdot 10^{-6}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$
		Максимум	$4,53 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-2}$	$9,43 \cdot 10^{-1}$
		Число точек	96	96	96

чением минерализации вод. В пресных слабощелочных водах озер (оз. Тере-Хол, пресное у оз. Бай Хол) концентрации тория составляют $6-9 \cdot 10^{-7}$ мг/л, а концентрации урана от $1,6 \cdot 10^{-3}$ до $1,3 \cdot 10^{-2}$ мг/л, что определяет десятичные доли торий-уранового отношения. В соленоватых слабощелочных водах (оз.оз. Кислое, Белое, Ак, Амтайгын, Каък у р. Элегест) с минерализацией до 8560 мг/л происходит увеличение концентраций тория (от $2 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-5}$ мг/л), но при одновременном увеличении концентраций урана (от $4,4 \cdot 10^{-4}$ до $7,2 \cdot 10^{-2}$ мг/л) наблюдается снижение торий-уранового отношения до тысячных и десятитысячных значений. В слабосоленых щелочных водах озер (Хадын, Убсу-Нур тув, Шара-Нур, Бай-Хол) с минерализацией от 13126 до 28753 мг/л сохраняется тенденция к накоплению в водах этих элементов, хотя концентрации тория остаются на прежнем уровне и в среднем составляют $8,7 \cdot 10^{-6}$ мг/л, а концентрации урана в среднем составляют $3,7 \cdot 10^{-2}$ мг/л, что характеризуется десятичными значениями торий – уранового отношения. Эта тенденция сохраняется в слабых рассолах оз. Чедер при изменении минерализации вод от 62553 до 107498 мг/л и в крепких рассолах (оз.-оз. Дус-Хол Танды, Дус-Холь (оз. Сватиково), Каък-Хол Грязево у оз. Сватиково, Дус Хол (Самалгатай) при минерализации от 160170 до 327672 мг/л. Максимальные концентрации тория при этом ($2,44 \cdot 10^{-4}$ мг/л) обнаружены в озере Каък-Хол Грязево (у оз. Сватиково), а урана – $0,5171$ мг/л в оз. Дус Холь (Самалгатай). Торий – урановое отношение в рассолах сохраняется на уровне десятичных значений и повысилось до тысячных в озере Каък-Хол Грязево (у Сватиково) при концентрации урана $0,1157$ мг/л и минерализации 217457 мг/л. В общей выборке поверхностных водоемов (табл. 2) сред-

ние значения тория равны $1,059 \cdot 10^{-5}$ мг/л, урана – $0,03$ мг/л, а значения торий уранового отношения $4,0 \cdot 10^{-3}$.

В пресных водах родников горного обрамления Тувинского прогиба (табл. 3) средние значения тория составляют $2,16 \cdot 10^{-6}$ мг/л и урана $3,16 \cdot 10^{-3}$ мг/л. Максимальные значения тория в пресных водах обнаружены в воде родника Устуу Доргун с высоким содержанием урана ($0,02$ мг/л) и в роднике Шивилиг 5 с повышенными концентрациями радона в водах. Средние значения торий – уранового отношения в пресных водах составляют $6,89 \cdot 10^{-4}$ и изменяются от $5,38 \cdot 10^{-6}$ до $9,4 \cdot 10^{-1}$. Максимальные значения торий уранового отношения обнаружены в щелочных пресных водах родника Уру, что обусловлено самыми низкими концентрациями урана $5,46 \cdot 10^{-6}$ мг/л и вдвое превышающими средние значения в пресных водах концентрациями тория ($5,15 \cdot 10^{-6}$ мг/л).

В солоноватых подземных водах родников (Хурегечи, Сенек, Улуг-Хем, Утук-Дуруг, Улаатай, Тос-Булаг, Шуйский, родник у оз. Чедер, Кооп-Терек (Южный Торголык), скважина у оз. Дус-Хол (Сватиково)) средние значения тория составляют $1,41 \cdot 10^{-6}$ мг/л (табл. 4), в то время как под воздействием процессов накопления урана в водах с повышением их минерализации максимальные значения урана в этих водах увеличиваются до $0,24$ мг/л, а значение торий уранового отношения уменьшается и в среднем составляет сотые доли. Вместе с тем, в родниках у оз. Сватиково по данным режимных наблюдений в 2014 г. отмечается некоторое повышение концентраций тория и значений торий уранового отношения, при увеличении в водах иттрия и редкоземельных элементов.

Резко восстановительные условия геохимической среды термальных щелочных пресных вод природного комплекса Уш Белдир со средней минерализацией 371 мг/л и значениями pH от $9,5$ до $9,82$ и Eh от (-400) до (-460) мВ характеризуются средней концентрацией тория $1,9 \cdot 10^{-5}$ мг/л (табл. 5). При этом наибольшие концентрации тория в этих водах родника 1 достигают $8,9 \cdot 10^{-5}$ мг/л. В тоже время концентрации урана снижаются в среднем до $1,4 \cdot 10^{-5}$. Наибольшие концентрации урана здесь встречены в том же роднике 1 и составляют $1,26 \cdot 10^{-5}$ мг/л, а значение торий уранового отношения в водах этого родника равно 7. В целом в этих водах торий-урановое отношение изменяется от 3 до 13 и в среднем составляет 6,5, благодаря сохранению в растворе тория и неблагоприятных условий для накопления урана. При изменении геохимической обстановки на менее восстановительную в роднике 6 при Eh – 60 мВ увели-

Таблица 4. Распространенность урана и тория в солоноватых водах Тувинского прогиба

Объект	pH	Мин., мг/л	Параметры	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
Родники	7,33	2123	Медиана	$1,41 \cdot 10^{-6}$	$8,2 \cdot 10^{-3}$	$7,63 \cdot 10^{-5}$
			Минимум	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3,56 \cdot 10^{-6}$	$8,29 \cdot 10^{-6}$
			Максимум	$7,38 \cdot 10^{-6}$	$2,37 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$
			Количество проб	16	16	16
Западный источник у оз. Сватиково	7,38	2369	Медиана	$8,2 \cdot 10^{-6}$	$8,37 \cdot 10^{-3}$	–
			Минимум	$2,02 \cdot 10^{-6}$	$8,04 \cdot 10^{-3}$	–
			Максимум	$2,22 \cdot 10^{-5}$	$8,66 \cdot 10^{-3}$	–
			Число точек	8	8	–
Восточный источник у оз. Сватиково	7,49	2570	Медиана	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-4}$
			Минимум	$2,52 \cdot 10^{-6}$	$1,59 \cdot 10^{-2}$	$1,54 \cdot 10^{-4}$
			Максимум	$1,78 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$
			Число точек	6	6	14

Таблица 5. Распространенность урана и тория в азотных термах природного комплекса Уш-Белдир

Объект	T, °C	Мин, мг/л	pH	Eh, мВ	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
Скв 2рэ/4	72	373,34	9,68	–466	$3,39 \cdot 10^{-6}$	$3,68 \cdot 10^{-7}$	9,23
Источник 1	75	377,24	9,61	–460	$8,97 \cdot 10^{-5}$	$1,26 \cdot 10^{-5}$	7,12
Скв. 1	81	372,34	9,42	–400	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$8,19 \cdot 10^{-7}$	12,99
Скв. 10рэ	82,5	373,43	9,23	–466	$9,39 \cdot 10^{-6}$	0	–
Скв 1рэ/5	83	374,26	9,34	–482	$5,38 \cdot 10^{-6}$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	5,19
Скв 3рэ	82,7	374,11	9,46	–476	$6,85 \cdot 10^{-6}$	$2,08 \cdot 10^{-6}$	3,29
Источник 3	56	358,43	9,84	–464	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$5,38 \cdot 10^{-6}$	2,60
Источник 2	59	368,72	10	–400	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$3,23 \cdot 10^{-6}$	4,80
Источник 6	50	352,32	9,74	–60	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,04 \cdot 10^{-4}$	0,20
Поверхностный водоток	1,5	190,90	7,76	157	$4,09 \cdot 10^{-7}$	$2,12 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$

чивается практически на порядок концентрация урана до $1 \cdot 10^{-4}$ мг/л и значение торий-уранового отношения снижается до 0,2.

В поверхностных водах природного комплекса Уш-Белдир в окислительной геохимической среде с Eh 157 мВ концентрация тория снижается до $3,1 \cdot 10^{-7}$ мг/л, а концентрация урана увеличивается до 0,002 мг/л, что определяет десятитысячные доли торий-уранового отношения. Таким образом, щелочные восстановительные условия в термальных водах благоприятны для миграции и сохранению в растворе тория, а также лития, кремния, галлия, германия, циркония, молибдена, сурьмы, вольфрама, а в отдельных случаях иттрия, лантана, церия и других редкоземельных элементов.

В трещинно-жильных термальных водах **природного комплекса Тарыс** (табл. 6) восстановительной обстановки со средними значениями с Eh-329 мВ в щелочных водах со средним значением pH 9,56 концентрация тория в среднем составляет $1,1 \cdot 10^{-5}$ и характеризуются наиболее низкими концентрациями урана, которые в среднем составляют $7,0 \cdot 10^{-5}$ мг/л и изменяются от $4,9 \cdot 10^{-6}$ до $9,0 \cdot 10^{-6}$ мг/л, что определяет целые значения Th/U отношения: от 1,15 до 2,4 при среднем значении – 1,15.

В субтермальных трещинно-жильных водах в центральной части природного комплекса Тарыс в восстановительной геохимической обстановки с Eh – 302 мг/л и pH – 9,13 средние значения тория составляют 0,000055 мг/л с максимальным значением 0,00015 мг/л. Одновременно с этим отмечается повышение концентрации ура-

на на порядок в сравнении с их распределением в термальных водах и увеличение урана до 0,0019 мг/л. Эти обстоятельства определяют преобладание десятых значений торий-уранового отношения, что в среднем составляет 0,42. Наблюдаемое увеличение концентраций тория и особенно урана в центральной части природного комплекса Тарыс сопровождается увеличением иттрия, редкоземельных элементов, особенно лантана и церия, что, возможно, связано с проявлениями редкоземельной минерализации. В холодных грунтовых водах зоны региональной трещиноватости концентрация тория снижается до $2,8 \cdot 10^{-6}$ мг/л и отмечается повышение концентраций урана до $2,9 \cdot 10^{-3}$ мг/л, что и определяет десятитысячные доли торий-уранового отношения.

В поверхностных водах природного комплекса Тарыс с температурой 14 °C, Eh 49 мВ минерализацией 229 мг/л концентрация тория составляет 0,0000013 мг/л, увеличивается концентрация урана – 0,0034 мг/л и торий-урановое отношение снижается до 0,0004.

В азотных субтермах **Тункинской долины** (табл. 7) в скв Р-1 (метановая) пос. Жемчуг (Вышка) слабо щелочных солоноватых с минерализацией от 1259 до 308 мг/л отмечается пульсационный (Соктоев и др., 2015) характер обогащения вод торием от $5,6 \cdot 10^{-7}$ до $2,3 \cdot 10^{-6}$, а урана от $8,9 \cdot 10^{-7}$ до $3,8 \cdot 10^{-5}$, в отдельных случаях вплоть до превышения концентраций тория над концентрациями урана, что и определяет изменение торий-уранового отношения от 0,01 до 2,6.

В азотных субтермах Тункинской долины в слабощелочных солоноватых водах пос. Нилова Пустынь концен-

Таблица 6. Распространенность урана и тория в трещинно-жильных водах природного комплекса Тарыс

T, °C	Eh, мВ	pH	Мин., мг/л	Параметры	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
35,4	-285,7	9,36	519	Медиана	$1,18 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,66
				Минимум	$3,13 \cdot 10^{-6}$	$3,94 \cdot 10^{-6}$	0,01
				Максимум	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-3}$	2,39
				Число точек	23	-	-

Таблица 7. Распространенность урана и тория в азотных термах Тункинской долины

Местоположение	Объект	T, °C	pH	Мин., мг/л	Th	U	Th/U
Поселок Жемчуг (Вышка), 2012 г	скв. Р-1	38	7,55	1259	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,47 \cdot 10^{-2}$
Поселок Жемчуг (Вышка), 2015 г	скв. Р-1	27	8,5	1308	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$8,89 \cdot 10^{-7}$	2,59
Село Ниловая Пустынь, 2015 г.	ванный корпус №2	23,2	7,6	1031	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$8,45 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-2}$
Село Ниловая Пустынь, 2015 г.	ванный корпус №1	31,6	8,1	935,4	$6,6 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-3}$

Таблица 8. Распространенность урана и тория в термальных углекислых водах Тункинской долины

Местоположение	Объект	T, °C	pH	Мин., мг/л	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
Месторождение Аршан	Скв. 41	27,3	6,98	3806	$2,81 \cdot 10^{-6}$	$8,44 \cdot 10^{-4}$	$3,34 \cdot 10^{-3}$
	Скв. 39, 2015 г.	22,2	6,84	3697	$2,06 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$1,02 \cdot 10^{-2}$
Пос. Жемчуг	Бассейн скв. Г-1	38	7,05	5021	$4,99 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-5}$	$4,19 \cdot 10^{-1}$
	Скв. Г-1 (устье), 2012 г.	55	7,03	4926	$3,39 \cdot 10^{-7}$	$2,55 \cdot 10^{-5}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$

Таблица 9. Распространенность урана и тория в углекислых водах природного комплекса Чойган (Восточные Саяны, Тува)

Тип воды	Число точек	T, °C	pH	Мин., мг/л	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
Радоновые холодные	3	18,6	6,27	1177	$9,0 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{-4}$
Холодные	10	16,6	6,29	1340	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$
Радоновые термальные	5	27,6	6,3	2170	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$
Термальные кремнистые	8	31,4	6,32	2401	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$

трации тория составляют около $1 \cdot 10^{-5}$ мг/л, а урана около 0,001 мг/л и торий урановое отношение составляет от 0,004–0,018.

В азотно-углекислых субтермальных водах Тункинской долины в пос. Аршан в скв. 39 и 41 месторождения в слабокислых солоноватых водах с минерализацией 3697–3806 мг/л также прослеживается пульсационный характер поведения тория с изменениями концентраций от $2,8 \cdot 10^{-6}$ до $2,1 \cdot 10^{-5}$ и урана от 0,0008 до 0,002 мг/л и, соответственно, сотых и тысячных значений торий уранового отношения.

В азотно-углекислых субтермальных водах Тункинской долины в бассейне скв. Г-1 пос. Жемчуг (Вышка) нейтральных солоноватых с минерализацией 4926–5021 мг/л отмечается низкие концентрации тория ($3,3 \cdot 10^{-7}$ – $4,9 \cdot 10^{-6}$ мг/л и урана (1 – $2,5 \cdot 10^{-5}$ мг/л) определяют от 0,01 до 0,4 и сопровождаются повышением концентраций лития, бора, германия, иттрия и редкоземельных элементов (до 0,0001 мг/л по их сумме).

В азотно-углекислых холодных трещинно-жильных водах природного комплекса Чойган (Восточные Саяны, Тува) слабокислых с pH 6,28 и Eh 182,8 мВ солоно-

ватых с минерализацией 1259 мг/л концентрация тория составляет $2,9 \cdot 10^{-6}$ мг/л, а урана – 0,0040 мг/л, и торий урановое отношение – 0,003 (табл. 9).

В термальных азотно-углекислых водах природного комплекса Чойган с температурой 29,5 °C слабокислых с pH 6,31 и Eh –21 мВ солоноватых с минерализацией 2285 мг/л концентрации тория повышаются почти на порядок и составляют $2,6 \cdot 10^{-5}$, а концентрации урана остаются практически на том же уровне – $2,6 \cdot 10^{-3}$ мг/л, и торий урановое отношение составляет 0,0076.

С повышением температуры вод в углекислых трещинно-жильных водах природного комплекса Чойган существенно увеличиваются концентрации редкоземельных элементов, сумма которых достигает 0,0072 мг/л. Максимальная концентрация тория в углекислых водах составляет $5 \cdot 10^{-5}$ мг/л, торий урановое отношение – 0,013 и в среднем составляет 0,0053.

В грунтовых водах зоны региональной трещиноватости природного комплекса Чойган содержание тория на порядок меньше – $1,5 \cdot 10^{-6}$, урана – $1,9 \cdot 10^{-3}$ мг/л, а торий урановое отношение – 0,0008.

В сравнении с азотными термами для трещинно-

Таблица 10. Распространенность урана и тория в холодных углекислых водах Тункинской долины и Восточных Саян северо-восточной Тувы

Объект	T, °C	pH	Min, мг/л	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
<i>Месторождение Аршан</i>						
Скважина 35, р. Кынгырга	15	6,16	3933,3	$5,19 \cdot 10^{-6}$	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$6,38 \cdot 10^{-4}$
Скважина "Писающий мальчик"	8,5	6,14	2164,9	$6,62 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-3}$	$7,35 \cdot 10^{-5}$
<i>Восточные Саяны (северо-восток Тувы)</i>						
Родник Соруг	–	–	–	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$
Родник Шандал-Ой (Соругский)	–	6,03	1425	$1,34 \cdot 10^{-4}$	0,03	$4,47 \cdot 10^{-3}$
Родник Арыскан (Даштыг), 2012 г.	–	6,55	3244	$5,2 \cdot 10^{-4}$	1,23	$4,19 \cdot 10^{-4}$
Родник Арыскан, 2014 г.	–	6,38	2169	$7,90 \cdot 10^{-5}$	0,58	$1,35 \cdot 10^{-4}$
Родник Нижний Улуг	–	6,44	1218	$1,25 \cdot 10^{-4}$	$4,68 \cdot 10^{-2}$	$2,67 \cdot 10^{-3}$

Таблица 11. Распространенность урана и тория в холодных подземных водах с повышенными значениями торий уранового отношения

Объект	T, °C	pH	Min, мг/л	Th, мг/л	U, мг/л	Th/U
<i>Холодные углекислые воды Кузнецкого Алатау (Терсинское месторождение)</i>						
Скв. 1011*	13	6,73	4600	$1,82 \cdot 10^{-5}$	$2,39 \cdot 10^{-6}$	7,64
Скв. 1142	8,7	6,7	5198	$6,08 \cdot 10^{-5}$	$7,81 \cdot 10^{-5}$	$7,7 \cdot 10^{-1}$
Скв. 1	12	6,3	21	$3,13 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	6,07
Скв. 2	13,6	7,4	411	$2,65 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	1,0
р. Терсь	19	8,4	52	$3,72 \cdot 10^{-6}$	$6,93 \cdot 10^{-6}$	$5,37 \cdot 10^{-1}$
<i>Пресные подземные воды четвертичных образований Томского водозабора Обь-Томского междуречья</i>						
Скв. 509р	–	6,4	92,27	$3,53 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	5,3
Скв. 508р	–	6,87	558	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1,0
Скв. 440р	–	7	494	$1,36 \cdot 10^{-4}$	$5,21 \cdot 10^{-5}$	2,6
<i>Пресные подземные воды палеогеновых образований Томского водозабора Обь-Томского междуречья</i>						
Скв. 505р	–	7,4	–	$5,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$	1,0
<i>Пресные подземные воды меловых образований Томского водозабора Обь-Томского междуречья</i>						
Скв. 190р	–	7	623	$2,13 \cdot 10^{-4}$	$1,98 \cdot 10^{-4}$	1,1

жильных азотно-углекислых вод Чойгана характерны повышенные концентрации урана, чем и определяются низкие значения торий уранового отношения.

В углекислых трещинно-жильных водах северо-востока Тувы в структурах Восточных Саян (табл. 10) на территории потенциального оруденения наблюдаются концентрации урана до 1,2 мг/л и, хотя в этих водах концентрации тория достигают максимальных значений – $3 \cdot 10^{-4}$ мг/л, торий урановое отношение составляет тысячные и десятитысячные значения. При этом концентрации редкоземельных элементов по сумме составляют до 0,027 мг/л и сопровождаются высокими концентрациями лития, бериллия, мышьяка, серебра и многих других элементов. Для сравнения при концентрации тория в водах скважины 8а-2 медно-молибденового месторождения Ак Суг на северо-востоке Тувы $3,6 \cdot 10^{-5}$ мг/л, а урана – 0,001 мг/л, и значения торий уранового отношения составляют 0,04, а сумма редкоземельных элементов – 0,0005 мг/л.

Анализ распространенности в водах тория и урана показывает, что только в термальных водах восстановительных геохимических сред торий иногда превышает концентрации урана. В холодных водах целые значения торий уранового отношения появляются при малых концентрациях урана и сохраняющихся концентраций тория

на уровне десятитысячных значений, согласующихся с повышением в этих водах иттрия и редкоземельных элементов.

В частности, высокие значения торий уранового отношения в углекислых холодных водах Терсинского месторождения в слабокислых с pH 6,65 и Eh –8 мВ солончатых с минерализацией 4600–5198 мг/л (от 1 и до 13), содержащие от $9 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ мг/л тория, а урана от $7 \cdot 10^{-7}$ до $2,6 \cdot 10^{-4}$, сопровождаются высокими концентрациями иттрия до $2 \cdot 10^{-3}$ мг/л и суммой редкоземельных элементов 0,0004 мг/л.

Целыми значениями торий-уранового отношения характеризуются пресные подземные воды Томского водозабора от 1,0 до 5,3, причем за счет повышенных концентраций тория (до 0,0003 мг/л) в водах скважин четвертичных отложений при низких концентрациях урана в водах – от 0,000025 до 0,00007 мг/л.

Приведенные данные о распространенности урана и тория в природных водах свидетельствуют о преобладающем влиянии на процессы накопления и рассеяния этих элементов внешних факторов их миграции в водах и, прежде всего, характера геохимической обстановки. Благоприятные условия для миграции шестивалентного урана в водах окислительной обстановки, особенно, под воздействием углекислых вод способствуют накоп-

лению урана до экстремальных значений –1,2 мг/л в роднике Арыскан, в то время как восстановительная геохимическая среда природных термальных вод природных комплексов Чойган, Тункинской впадины, Уш Белдир и Тарыс, а также подземных вод Обь Томского междуречья, характеризуются минимальными концентрациями урана в водах и наличием тория в концентрациях на уровне максимальных значений, обнаруженных в изученных водах зоны гипергенеза.

На участках потенциальной ураноносности при увеличении концентраций урана в водах наблюдается одновременное повышение концентраций тория и часто редкоземельных элементов. Вместе с тем необходимо подчеркнуть невысокий диапазон наблюдаемых концентраций тория в водах разных геохимических типов: минимальные концентрации тория определяются пределом обнаружения – 10^{-7} мг/л и обнаруженными максимальными значениями тория в углекислых водах родника Арыскан – 0,00052 мг/л ($5,2 \cdot 10^{-4}$ мг/л), который составляет всего три математических порядка.

Анализ распространенности урана и тория в водах показывает достаточно сложную картину соотношений радиоактивных элементов в водах. Это разнообразие связано с отличительным характером поведения этих элементов в условиях зоны гипергенеза. Учитывая малую способность тория к миграции в водах окислительной обстановки зоны гипергенеза [7], благоприятной для миграции и накопления урана, необходимо учитывать процессы перераспределения этих элементов в водах и донных осадках при изучении геологической

эволюции системы вода-порода и проведении поисковых и эколого-геохимических исследований.

Литература

1. Арбузов С.И., Рихванов Л.П. *Геохимия радиоактивных элементов : учебное пособие. – 3-е изд., исправленное и дополненное. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 304 с.*
2. Вернадский В.И. *Очерки геохимии. – Л. : Горно-геолого-нефтяное изд-во, 1934. – 380 с.*
3. *Распространенность урана и тория в природных водах Тувы / Ю.Г. Копылова, Н.В. Гусева, Ч.К. Ойдуп и др. // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы IV Международной конференции, 4-8 июня 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 291-295.*
4. *Минералого-геохимические особенности травертинов современных континентальных гидротерм (скважина Г-1, Тункинская впадина, Байкальская рифтовая зона) / Б.Р. Соколов, Л.П. Рихванов, С.С. Ильинок и др. // Геология рудных месторождений. – 2015. – Т. 57, № 4. – С. 370–386.*
5. *Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / А.П. Соловов, А.Я. Архипов, В.А. Бугров и др. – М. : Недра, 1990. – 335 с.*
6. Судыко А.Ф. *Определение урана и тория в природных объектах нейтронно-активационным методом // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : материалы III международной конференции. – Томск : Тандем-Арт, 2004. – С. 587–592.*
7. Шварцев С.Л. *Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М. : Недра, 1998. – 366 с.*

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ CS-137 В ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЛАНДШАФТНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДОЛИНЫ Р. ИПУТЬ (БРЯНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Е.М. Коробова¹, С.Л. Романов², С.С. Киров³, В.Ю. Берёзкин¹, В.С. Баранчуков¹

¹ГЕОХИ РАН, Москва, Россия, korobova@geokhi.ru, victor76@list.ru

²УП “Геоинформационные системы”, Минск, Беларусь, romanov_s_l@mail.ru

³ИГКЭ Роскомгидромета и РАН, Москва, Россия

SPATIAL DISTRIBUTION OF CS-137 IN ELEMENTARY LANDSCAPE-GEOCHEMICAL SYSTEMS OF THE VALLEY OF THE IPUT RIVER (BRYANSK REGION)

E.M. Korobova¹, C.L. Romanov², S.S. Kirov³, V.U. Beryozkin¹, V.S. Baranchukov¹

¹GEKHI RAN, Moscow, Russia

²Unitary enterprise “Geoinformation Systems”, Minsk, Belorussia

³Institute of Global Climate and Ecology, Moscow, Russia

The study of spatial distribution of chemical elements in pedosphere is one of the most important and at the same time the least studied issues in modern Geochemistry. The objective of the research was a detailed study of distribution patterns of Cs-137 in soils of conjugated elementary landscapes contaminated as a result of the Chernobyl accident of 1986. The study has shown that 30 years after the accident the main part of Cs-137 in soil cover is still stored in the upper 10–20 cm layer. Redistribution of Cs-137 amount in geochemically conjugated landscape toposequence is characterized by gradual decrease along the slope of the terrace down to supereaqueous elementary units in correspondence to increase of the soil humidity.