

УДК 539.163:546.795:574

КОНЦЕНТРАЦИЯ ТОРИЯ В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ: ОБЗОР МИРОВЫХ ДАННЫХ

© 2020 г. С. В. Фесенко^{1,*}, Е. С. Емлютина¹¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Поступила в редакцию 16.09.2019 г.

После доработки 24.04.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Представлен обзор данных по содержанию тория в почвах, атмосфере, поверхностных водах и донных отложениях. Показано, что концентрации ^{232}Th в почве регионов с нормальным радиационным фоном варьируют от 5 до 95 Бк/кг, в водной среде от 1.0×10^{-5} до 1.0×10^{-2} Бк/л, в донных отложениях поверхностных вод от 4 до 100 Бк/кг, грунтовых водах от 0.6×10^{-7} Бк/л до 1.0×10^{-4} Бк/л, а в приземном слое атмосферы от 0.1 до 1×10^{-4} Бк/м³. В районах с повышенным фоном и местах добычи ториевых руд, редкоземельных элементов, или олова, концентрации тория в объектах окружающей среды могут быть от одного до четырех порядков выше концентраций тория в областях нормального радиационного фона. Использование данных о нарушении изотопного равновесия содержания тория в различных средах может быть использовано для оценки путей поступления тория в окружающую среду. Отмечено, что пространственные закономерности содержания тория в почве и донных отложениях довольно близки и отличаются от закономерностей распределения тория в поверхностных водах.

Ключевые слова: торий, уран, природные среды, обзор данных, почва, поверхностные воды, донные отложения, атмосфера

DOI: 10.31857/S0869803120050033

Торий относится к тяжелым естественным радионуклидам (ТЕРН), которые образовались в основном как результат реакций ядерного синтеза во время формирования Земли, т.е. около 4.6×10^9 лет назад. Большинство из них, исключая ^{242}Np , имеют периоды полураспада, которые близки к возрасту Земли и еще полностью не распались [1–3]. Первичные радионуклиды имеют относительно низкое содержание в окружающей среде и, в целом, они не оказывают существенное радиационное воздействие на человека и биоту, за исключением некоторых продуктов распада ^{238}U , таких как ^{210}Po , внося вклад в природный радиационный фон. Более того, воздействие многих тяжелых радионуклидов на окружающую среду часто оценивается на основе токсикологических критериев [2].

В то же время в районах с высоким радиационным фоном или в районах добычи некоторых металлов, фосфатов, урановой и ториевых руд содержание тория может достигать достаточно больших величин, а торий может определять дозы облучения человека и природных организмов [2].

Среднее содержание тория в земной коре составляет около 5.6 ppm (или 5.6 мг/кг). Торий

имеет более высокое содержание в верхней части земной коры – 10.5 ppm, в то время как средняя концентрация тория в нижней части земной коры составляет 1.2 ppm [1–3].

Известен 31 радиоактивный изотоп тория, шесть из которых относятся к тяжелым естественным радионуклидам, а 25 имеют техногенное происхождение. ^{234}Th и ^{230}Th принадлежат к цепочке распада ^{238}U , ^{228}Th к цепочке распада ^{232}Th , а ^{231}Th и ^{227}Th – к цепочке распада ^{235}U . Учитывая различия в содержании в земной коре материнских радионуклидов, а также различия в периодах полураспада, основной интерес вызывают три изотопа тория, а именно, ^{228}Th , ^{230}Th и ^{232}Th .

Среднее содержание ^{238}U составляет около 2.7 промилле (2.7 мг/кг), или, в единицах активности – 33 Бк/кг. Предполагая равновесие в цепочках распада, средние значения содержания изотопов тория можно оценить как: 23, 34 и 23 Бк/кг для ^{228}Th , ^{230}Th и ^{232}Th соответственно. В единицах массы эти значения можно представить в виде ряда 7.57×10^{-10} , 4.46×10^{-5} и 5.67 мг/кг.

Таким образом, в массовых единицах природный торий в основном состоит из ^{232}Th и токсикологическое значение тория связано главным об-

разом с этим изотопом. Следует также отметить, что изменение изотопного равновесия во многих ситуациях позволяет судить об источниках поступления тория в окружающую среду.

В большинстве пород и почв торий находится в низких концентрациях. Он в 3 раза больше распространен, чем уран, и имеет содержание в почве, близкое к содержанию свинца [2]. Торий в окружающей среде обычно встречается в ассоциации с ураном и редкоземельными элементами в различных типах горных пород, таких как отложения торитов, торианитов, урано-торитов и редкоземельных элементов. Также встречается в качестве бастнезитов в карбонатах и, в качестве монацитов, в гранитах, сиенитах, пегматитах и других кислотных магматических образованиях.

Подобно урану, торий в почве может присутствовать в различных химических формах в зависимости от почвенных параметров, таких как окислительно-восстановительный потенциал (Eh), pH, содержание органического вещества и т.д. Временные и пространственные колебания этих параметров могут приводить к изменениям в формах нахождения тория как в почве, так и в поверхностных водах [2, 3].

В районах добычи полезных ископаемых (урана, тория и редкоземельных элементов) может отмечаться существенное поступление тория в окружающую среду, в первую очередь из хвостохранилищ, отвалов породы, забалансных вод шахт или открытых рудников [3]. Таким образом, возможно загрязнение торием подземных вод, перенос тория на нижние склоны ландшафтов. При этом торий может находиться во множестве форм от растворимых и высокодисперсных до крупнозернистых осадков, приводящих к осадочным отложениям. В местах, где торий поступает в дренажную сеть поверхностных вод, проникновение тория в горизонт грунтовых вод и их затопление могут привести к обширному загрязнению окружающих пойм рек [2–4].

Корректная оценка воздействия повышенных концентраций тория на окружающую среду предполагает наличие данных о фоновых концентрациях тория в почвах, водной среде и приземном слое атмосферы. Данные по содержанию тория в объектах окружающей среды сравнительно редки, что определяет необходимость анализа и обобщения доступных данных по содержанию тория в этих объектах. В то же время в последнее время был опубликован ряд крупномасштабных исследований в Европе, Канаде, Африке и Австралии, позволяющих в значительной мере восполнить этот пробел.

Данная публикация является первой статьей из серии, посвященной обобщению мировых данных по содержанию и оценке параметров миграции тория в окружающей среде, включая под-

стилающие породы, почвы, растения и животных. Цель данной статьи — обзор данных по содержанию тория в почвах, атмосфере, поверхностных водах и донных отложениях.

ТОРИЙ В ГОРНЫХ ПОРОДАХ

Основными горными породами, в которых встречается торий, являются россыпные отложения, карбонаты, алкалиновые и пералкалиновые магматические комплексы, граниты, пегматиты, золоторудные месторождения руд оксида железа (IOCG), размещенных внутри железосодержащих доминантных жильных комплексов, которые имеют общее генетическое происхождение. К ним также относятся пиритные конгломераты кварцевой гальки, отложения скарнов и роговиковых пород, фосфаты, уголь, торф и углеродистый материал [2]. Также установлено, что в метаморфических горных породах находится больше тория, чем в магматических породах [2, 3].

Торий содержат более ста минералов, но только несколько из них содержат концентрации тория, при которых добыча тория является экономически обоснованной. Наиболее распространенными первичными минералами для Th являются соединения U, Zr, или Ce, которые изоморфны ториевым составляющим, таким как циркон, уранинит.

Монацит является наиболее важным источником тория. Мировые ресурсы монацита составляют около 12 млн тонн. Крупнейшие разведанные запасы тория встречаются на пляжах и месторождениях тяжелых минеральных песков [3]. Первоначально содержащиеся в горных породах (пегматиты и другие изверженные породы, а также гнейсы), эти тяжелые минералы перемещаются с водным стоком в виде фрагментов горных пород и осаждаются в руслах рек и морских берегах. Отложения тяжелых минеральных песков могут отмечаться на глубине до 6 м на песчаных пляжах вдоль прибрежных районов. Монациты, содержащие торий, обычно составляет менее 1% тяжелого минерального песка. Смешанный фосфатный минерал с химической формулой $(\text{RE}/\text{Th}/\text{U})\text{PO}_4$ содержит 3–14% оксида тория [4].

Торит (ThSiO_4) содержит до 62.75% оксида тория. Некоторые ториты также содержат уран (ураноторит). В районе пролива Лехми Айдахо сообщалось о крупных жилах торита (100 000 т оксидов тория). Торианит $[(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2]$ встречается в пегматитах, гранитах и гнейсах и имеет черный, коричневый или серый цвет с металлическим оттенком до жирного блеска [3]. Содержание в них тория колеблется от 45 до 88%. Этот минерал также часто содержит значительное количество (~46%) урана (уранторианита). Известны отложения торианита на Мадагаскаре и в Канаде. К другим торийсодержащим минералам от-

носятся торогуммит, алланнит, бастнезит и ксенотим [1, 3].

Торогуммит $[Th(SiO_4)_{1-x}(OH)_{4x}]$ представляет собой гидратированный силикат тория и урана, содержащий 2.5–31.5% урана и 18.2–50.8% тория. Алланнит $[(Ce, Ca, Y, Th)_2(Al, Fe, Mg)_3(SiO_4)_3(OH)]$ представляет собой сложный силикат, содержащий до 4.35% тория [3].

Бастнезит $[(Ce, Th, La, Y, Ca)(CO_3)F]$ представляет собой фторокарбонат редкоземельных металлов (главным образом Ce и La), содержащий до 41% тория, но менее 1% урана. Большинство месторождений бастнезита находятся в метаморфических зонах, которые богаты редкоземельными элементами, барием, CO_3 и фтором. Фосфат иттрия $[YPO_4]$ может содержать до 2.2% тория. Он часто встречается в пегматитах и в качестве второстепенного вспомогательного минерала в гранитах и гнейсах. Большое разнообразие других ниобат-танталатов и монацитоподобных минералов также может содержать небольшое количество тория [2, 3].

СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В ПОЧВАХ

Концентрации тория в почве обычно отражают его концентрацию в подстилающих породах. Подстилающие породы подвержены действию природных факторов, в частности, изменениям действия температуры, воды, флоры и фауны, и т.д., т.е. факторам, способствующим разложению коренных пород и формированию почвы. Типичные средние концентрации встречающихся в природе ^{232}Th в разных почвах варьируют от 5 до 95 Бк/кг. Оценка среднемировой концентрации ^{232}Th , опубликованная в работе Бойла, равна 26 Бк/кг [1]. Типичные концентрации ^{232}Th , наблюдаемые в различных регионах земного шара, представительные для территорий с нормальным радиационным фоном при отсутствии антропогенной деятельности, приведены в табл. 1.

Обычно почвы образуются в результате выветривания верхнего слоя материнской породы или в результате горизонтального переноса и отложения образовавшихся почвенных частиц. Переносу тяжелых естественных радионуклидов способствуют также и природные явления, такие как землетрясения, вулканы, ледники, а также наводнения, приводящие к изменению состава и свойств почв.

Вода является основной средой, определяющей перенос тория в окружающей среде. Водная эрозия – вымывание водными стоками радиоактивных элементов – может привести к обогащению ими верхних горизонтов почвы, по сравнению с нижележащими слоями. Ветровой подъем также может вносить определенный вклад в перенос тория в окружающей среде.

Таблица 1. Концентрация тория в почвах, Бк/кг (на сухое вещество)

Table 1. ^{232}Th concentrations in soils, Bq/kg (dry mass)

Расположение	^{232}Th	Ссылки
Австралия	25–43	[5]
Бразилия	48 ± 30	[6]
Канада	20–80	[7]
Хорватия	47.1 ± 19.7	[8]
Россия	15.0–40.6	[2]
Индия	17.8–170	[9]
Япония	21.1	[10]
Иордания	21 ± 0.8	[11]
Марокко	14.0 ± 4.5	[12]
Нигерия	50–104	[13, 14]
Норвегия	24 ± 9	[15]
Испания	46.3 ± 0.8	[16]
Швеция	34.2 ± 21.1	[17]
Таиланд	49 ± 40	[18]
США	44 ± 15	[19]

Концентрация тория в осадочных почвах зависит от типа родительской породы, достигая максимальных значений в почвах, развивающихся на гранитах, щелочных магматических породах, сланцах и гнейсах и самой легкой на основных изверженных и карбонатных породах.

Средние данные по содержанию ^{232}Th в почвах ряда стран были также недавно опубликованы НКДАР ООН [20]. Сделанная на основе этих данных оценка средневзвешенной концентрации тория в почве составила 45 Бк/кг и медианном значении 30 Бк/кг. Более высокие средние значения тория в почвах отмечаются в странах, в которых добываются редкоземельные элементы, таких как Гонконг (95 Бк/кг), Индия (64 Бк/кг), Казахстан (60 Бк/кг), Малайзия (82 Бк/кг). Средние концентрации тория в почвах некоторых европейских странах, таких как Португалия (51 Бк/кг), Норвегия (45 Бк/кг) и Швеция (42 Бк/кг) также довольно высоки [20].

Фундаментальный обзор данных о содержании ^{232}Th в почвах России в зональном аспекте приведен в монографии [2]. Показано, что концентрации ^{232}Th в почвах варьируют от 15 до 52 Бк/кг, демонстрируя тенденцию к росту концентраций ^{232}Th в почвах в образцах, отобранных в южных районах [2].

Аналогичные зонально-региональные исследования были недавно проведены в Канаде [7]. Максимальные концентрации тория (80 Бк/кг) отмечены в подзолистых почвах северного шельфа, тогда как минимальные концентрации, около 20 (Бк/кг) и ниже, характерны для брунисольных (Brunisol) почв. Серо-бурые, глеевые почвы и лю-

висоли (Luvisol) занимали в этом ряду промежуточное положение. В целом данные, приведенные в этой работе для ^{232}Th , варьируют в диапазоне $<20\text{--}80$ Бк/кг и находятся в хорошем соответствии с данными, полученными для территории России [2].

Sheppard [7] также предоставил данные и для других изотопов тория: ^{228}Th и ^{230}Th . Отмечен явно выраженный эффект неизотопного равновесия для тория в почвах Канады, отражающий различия в почвообразовании. Так, отношение концентрации ^{228}Th к ^{232}Th в почве варьирует от 0.75 (известковые почвы, брунисоль) до 1.5 (тяжелые глинистые почвы, лювисоль). Отношение ^{230}Th к ^{232}Th варьирует в более широких пределах от 0.38 до 2.0, поскольку в этом случае на варибельность содержания тория в почвах накладывается изменчивость содержания в почвах ^{238}U , являющегося материнским радионуклидом для ^{230}Th .

Концентрации ^{232}Th в почвах Австралии варьируют в достаточно узком диапазоне. Максимальные средние концентрации ^{232}Th в почве отмечаются в провинции Виктория (43 ± 19 Бк/кг), а минимальные — 25 ± 17 Бк/кг в провинции Южная Австралия (табл. 1). В то же время большая варибельность данных, характерная для каждой из провинций Австралии, позволяет сделать вывод об отсутствии статистически значимых региональных различий в содержании тория в почвах этого континента [5].

Содержание тория в почвах Европы сильно варьирует [21]. В северной Европе, области ледникового дрейфа из Польши в Нидерланды, в центральной Финляндии, на севере Норвегии, в Западной Ирландии и на юге Испании, как правило, отмечаются низкие концентрации тория — менее 20 Бк/кг. Высокие концентрации тория в подстилающих грунтах (более 45 Бк/кг) отмечены в кристаллическом фундаменте иберийского массива в Португалии, на западе Испании, в щелочных магматических породах Италии, в почвах Центрального массива Франции, Словении, Хорватии и на севере Баварии. Повышенные концентрации тория отмечены и в почвах северо-восточной Греции, что связано с присутствием гранитных интрузий [21].

Высокая варибельность тория в почвах отмечается в странах, в которых содержатся ториевые или урановые месторождения (табл. 2). В Индии за пределами районов, в которых ведутся ториевые разработки, концентрация ^{232}Th в почве варьирует от 17.8 Бк/кг до 170 Бк/кг, тогда как содержание этого элемента в аллювиальных почвах штата Кералла составляет более 700 Бк/кг [9].

Исключительно высокие концентрации тория (500—5000 Бк/кг или выше) могут наблюдаться в почвах, глинах, латеритах и бокситах, развивающихся на щелочных породах, высокотемператур-

ных гранитах, карбонатитах и вблизи выхода пород, богатых торием. Большая часть тория в этих почвах присутствует в таких соединениях, как циркон, монацит, алланит, титанит, торианит и торит. Торий также присутствует во вторичных минералах, таких как баделлеит и торогуммит [3].

Из-за большого радиуса ионов торий обладает способностью концентрироваться в поздних кристаллизующихся породах, включая щелочно-магматические руды, что во многих случаях сопровождается присутствием редкоземельных элементов и некоторых элементов постперехода, таких как олово [20]. Поэтому концентрации активности тория в горных районах могут на несколько порядков превышать концентрации, характерные для равнинных областей.

В частности, концентрация тория в почвах и минеральных песках нигерийского района добычи олова (плато Джоса — $(1.7\text{--}9.8) \times 10^4$ Бк/кг) на четыре порядка выше, чем на окружающих территориях (табл. 2). Другим примером региона с повышенным содержанием тория является регион Фен в Норвегии, который является крупнейшим в мире месторождением тория (^{232}Th). Концентрации активности ^{232}Th в почвах этого региона варьируют от 1.0×10^3 до 7.0×10^3 Бк/кг, и торий является одним из основных элементов, определяющих радиационный фон в этом регионе.

Соотношение между различными изотопами тория может служить индикатором антропогенной деятельности. Повышенные концентрации ^{230}Th , являющегося продуктом деления ^{238}U , отмечаются и в районах, подверженных воздействию предприятий по производству фосфатных удобрений, содержащих повышенные концентрации урана [31]. Так, концентрации активности ^{230}Th в болотистой местности Одил в Уэльве (юго-западная Испания) достигают $(2.9 \pm 3.2) \times 10^2$ Бк/кг, хотя концентрации ^{232}Th (47 ± 28 Бк/кг) и ^{228}Th (70 ± 52 Бк/кг) являются типичными для зоны вне воздействия этих предприятий [31]. Таким образом, отношение концентрации ^{230}Th в почве к концентрации ^{232}Th , равное 4.9, указывает на высокие концентрации ^{238}U в этом районе, характерные для предприятий по производству фосфатных удобрений.

В работе [20] представлены значения 44 ± 14 , 48 ± 12 и 49 ± 16 Бк/кг в качестве фоновых значений для ^{232}Th , ^{230}Th и ^{228}Th соответственно для образцов почв, отобранных в штате Вайоминг, США (табл. 1). Концентрации ^{232}Th (42 ± 6 Бк/кг) и ^{228}Th (43 ± 4.4 Бк/кг), измеренные в районе расположения бывшего предприятия по добыче урана, близки к фоновым значениям в этой зоне, однако концентрации ^{230}Th (480 ± 130 Бк/кг) значительно превышают фоновые значения, вследствие предыдущей деятельности по добыче урана [29].

Таблица 2. Примеры территорий с высокими содержаниями тория в почвах, Бк/кг (на сухое вещество)
Table 2. Examples of areas of high ²³²Th concentrations in soil

Страна	Местоположение	²³² Th, Бк/кг		Ссылка
		Среднее	Диапазон	
Нигерия	Бисичи (почва)	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^4$		[13]
Нигерия	Бисичи (минеральный песок)	$(3.0 \pm 0.2) \times 10^4$		[13]
Нигерия	Среднее	$(8.2 \pm 0.5) \times 10^3$	$(1-50) \times 10^3$	[14]
Азербайджан	Среднее	100–1000		[21]
Китай ¹	Диапазон		312–605	[23]
Индия	Андхра-Прадеш, Ламбапур	140	54–340	[23]
Индия	Андхра-Прадеш, Маллапурам	270	222–520	[23]
Индия	Керала	684	1.66 ²	[9]
Индия	Керала	777	2.20	[9]
Индия	Керала	743	2.80 ³	[9]
Индия	Мегхалая, Домизиат	196 ± 64	68–441	[24]
Индия	Кинта, Джохор	246	(19–1377)	[25]
Индия	Сунгай, Джохор	628	(64–1806)	[25]
Малайзия	Сегамат, Джохор	261	(11–1210)	[25]
Малайзия	Кинта, Джохор	246	(19–1377)	[26]
Малайзия	Сегамат, Джохор	280	(60–1200)	[27]
СССР	Коми		100–1600	[2]
Чехия	Среднечешский край		74–159	[21]
Норвегия	Шпицберген	$(4.4 \pm 1.3) \times 10^3$	1000–7000	[15, 28]
Бразилия	Плато Посус-ди-Калдас	284 ⁴		[6]
Бразилия	Прета (пляж)	239 ± 74	128–349	[29]
США	Водно-болотные угодья в Саванне (река)	820 ± 750	140–2200	[30]
США	Бывший участок добычи U	481 ± 126		[19]

¹ Урановые хвостохранилища.

² Геометрическое стандартное отклонение.

³ Геометрическое стандартное отклонение.

⁴ ²²⁸⁺²³²Th, концентрация ²³⁰Th – 149 Бк/кг (сухой вес).

Экологические последствия добычи угля, связанные с поступлением тория в окружающую среду, рассмотрены в работах [15, 28]. В районах, затронутых добычей угля, средняя концентрация ²³²Th в почве составляла 44 ± 30 Бк/кг (диапазон – 9.6–61 Бк/кг), что почти в 2 раза больше, чем было измерено для окружающих областей (табл. 2).

Таким образом, концентрации тория в регионах повышенного ториевого фона обычно от одного до трех порядков выше концентраций тория в областях нормального фона, что приводит к повышенным дозам внешнего облучения жителей таких регионов.

ТОРИЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Выброс тория в атмосферу может происходить как из природных, так и из антропогенных источников. К природным источникам относятся, в первую очередь, ветровой подъем частиц почвы, а также частицы, поступающие в атмосферу в результате извержений вулканов [32, 33]. Почва образуется вследствие физического и химического выветривания горных пород и минералов. Мелкие частицы почвы (<10 мкм), содержащие все встречающиеся в природе изотопы тория, могут захватываться ветром и переноситься на большие расстояния. Извержения вулканов также являются естественным источником тория в воздухе, так

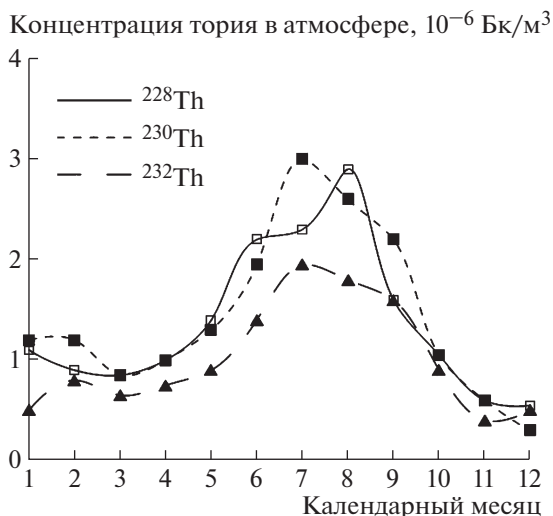


Рис. 1. Сезонные колебания концентраций изотопов тория в приземном слое атмосферы.

Fig. 1. Seasonal variations thorium isotope concentrations in the ground layer of the atmosphere.

как вулканический пепел содержит примерно 4.3 Бк/кг ²³²Th [32].

Определенное количество тория поступает в воздух и в результате сжигания ископаемого топлива, угля, газа и нефти. Концентрации ²³²Th в летучей золе при сжигании угля, в зависимости от используемых технологий и свойств угля, варьируют от 15 до 150 Бк/кг [34]. Другим антропогенным источником тория для атмосферы является добыча урана, тория, редкоземельных элементов, олова или некоторых других продуктов, содержащих торий [20]. Такая деятельность также приводит к поступлению тория в окружающую среду, хотя воздействие локализовано.

Концентрация тория в атмосфере зависит от метеорологических условий, а также от размера, плотности и химической формы частиц, содержащих торий. Торийсодержащие частицы малого размера (<10 мкм) могут перемещаться на большие расстояния от источника происхождения. Концентрации тория в приземном слое во многом зависят от интенсивности пылеобразования. В Германии концентрация пыли варьирует в летний период от 0.1 до 70 мкг/м³. Вследствие этого концентрации ²³⁰Th и ²³²Th в приземном слое атмосферы также достаточно высоки и варьируют от 6 × 10⁻⁹ до 2.0 × 10⁻⁸ Бк/м³ на 1 мкг/м³ [34]. Более высокие значения содержания тория в атмосфере — 6.0 × 10⁻⁵ Бк/м³ для ^{228,232}Th и 3.2 × 10⁻⁴ Бк/м³ для ²³⁰Th были отмечены на плато Покос-де-Кальдас в Бразилии [29].

В морском воздухе над северо-западной частью Тихого океана концентрации ²³²Th варьировали от

0.36 × 10⁻⁷ до 2.2 × 10⁻⁷ Бк/м³, а отношение активности ²³⁰Th/²²⁸Th в аэрозолях колебалось от 3.0 до 70.0 [35]. Минимальные значения концентрации тория в атмосфере, 7.3 × 10⁻¹¹ Бк/м³ до 3.4 × 10⁻¹⁰ Бк/м³ со средним значением 2.4 × 10⁻¹⁰ Бк/м³, отмечены в районе Южного полюса. Предполагается, что содержание тория в полярной атмосфере определяется ветровым захватом частичек почвы или частиц воды океана [36, 37].

Поскольку атмосфера представляет собой очень динамичную систему, концентрации изотопов тория в воздухе отличаются в разные сезоны года. Ежемесячные измерения плутония и тория проводились в январе 2006 г. — декабре 2007 г. на равнине: в г. Цукуба (28 м над уровнем моря), и в ноябре 2006 г. — декабре 2007 г. на горе Харуна (1370 м над уровнем моря) в Японии [36]. Отмечено, что выпадения тория на равнине были выше, чем на горе Харуна, за исключением мая и июня 2007 г. Динамика осаждения изотопов тория и состав выпавших частиц в городе Цукуба и на горе Харуна в Японии позволили сделать вывод о том, что они состояли из мелких частиц почвы [38].

Кроме того, отмечены заметные сезонные различия в выпадениях ²³²Th, причем наиболее высокие значения выпадений отмечались весной, соответствуя периоду сильного запыления приземного слоя атмосферы. Отношение концентраций ²³⁰Th/²³²Th было использовано для разделения образцов осаждения на локальные и удаленные источники пыли. Показано, что большая часть общих отложений тория происходила из удаленных источников, особенно весной [38].

Пример сезонных изменений концентрации изотопов тория приведен на рис. 1 [39]. Поскольку для всех встречающихся в природе радионуклидов, включая изотопы тория, более высокие концентрации радионуклидов в воздухе отмечаются в периоды времени с более высокой среднемесячной температурой, в работе [39] предложено простое уравнение регрессии, описывающее этот эффект:

$$Q = aT(^{\circ}\text{C}) + b,$$

где Q — концентрация радионуклида в приземном слое атмосферы (Бк/м³), a и b — эмпирические параметры. В целом это говорит о том, что ветровой захват мелких частиц почвы может быть основным источником изотопов тория в их концентрации в приповерхностном воздухе.

Другой вывод, который следует из этих данных, заключается в том, что изотопы тория, главным образом ²³²Th и ²²⁸Th, не находились в равновесии в приземном воздухе, поскольку среднее значение отношения ²²⁸Th/²³²Th составляло 1.4 ± 0.3. Этот эффект может быть объяснен либо вкладом тория, происходящего из ²²⁸Ra, либо различными химическими свойствами этих изото-

пов, хотя для подтверждения любого такого вывода требуется больше данных.

Динамика концентраций ^{232}Th тория в приземном слое атмосферы вблизи радиохимического предприятия в Мальвеси (Франция) с сентября 2009 г. по июль 2010 г. описана в работе [40]. Максимальные значения активности ^{232}Th в аэрозолях на уровне $(5.0 \pm 0.5) \times 10^{-5}$ Бк/м³ были отмечены в июле, тогда как минимальные концентрации активности ^{232}Th в воздухе были отмечены в январе. Концентрации ^{230}Th в аэрозолях достигли максимума в январе $(1.2 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ Бк/м³ и колебались в остальные месяцы от 0.5 до 2.4×10^{-5} Бк/м³. Выявлено, что основным источником ^{230}Th были высохшие пруды, расположенные на объекте, и выброс зависел от метеорологических условий конкретного сезона [40]. Показано, что закономерности изменения концентраций тория в воздухе в районе этого предприятия отражают воздействие пылеобразования на загрязнение воздуха и сходны с данными об эффекте сезонности в концентрациях ^{232}Th , представленными в работе [36]. В то же время отмечено, что концентрации ^{232}Th и ^{230}Th в аэрозолях не коррелируют из-за различий в источниках их выбросов в атмосферу. Так, отношение этих изотопов в аэрозолях варьировало от $3.0\text{--}5.0 \times 10^{-4}$ Бк/м³ в мае-июле (т.е. времени, когда ветровой захват ^{232}Th достигает максимума) до $(1.27 \pm 0.26) \times 10^{-4}$ Бк/м³ в январе, когда влияние ветрового подъема минимально.

В целом можно сделать вывод, что для регионов с фоновым содержанием тория в окружающей среде отношение $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ в нижних слоях атмосферы колеблется от 0.7 до 1.5 [34], в то время как для районов, подверженных воздействию предприятий по добыче и переработке урана, это соотношение может варьировать от 6 до 130 [41].

ТОРИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ

В пресной воде торий присутствует в различных формах: растворенной, коллоидной, он также может быть сорбированным на взвешках. При этом концентрация растворенного тория в воде обусловлена образованием растворимых комплексов с карбонатами, гуминовыми кислотами или другими органическими лигандами [42–47].

Концентрации тория в поверхностных водах в регионах с нормальным радиационным фоном довольно низки и варьируют от 1.0×10^{-5} до 1.0×10^{-1} Бк/л. Более высокие значения наблюдаются в регионах с повышенным содержанием тория в материнских породах, а также в районах добычи урана, олова и редкоземельных элементов (табл. 3).

Исследования, выполненные при составлении Геохимического атласа Европы (проект Европейской Комиссии FOREG), позволили оценить

концентрации ^{232}Th в реках Европы, которые составили $(0.08\text{--}1.5) \times 10^{-3}$ Бк/л, при медианном значении — 0.37×10^{-3} Бк/л [44]. Относительно высокие концентрации тория: от 0.75×10^{-3} до 1.1×10^{-3} Бк/л были обнаружены на территории докембрийского щита в северных странах и в северо-восточной Германии [44]. Существенно более низкие концентрации тория в пробах воды отмечены в образцах, отобранных в юго-западной и северо-восточной Испании, на севере и юге Франции, в реках северной Италии, центральной Австрии, Албании и Греции.

Концентрации тория в горных породах обычно выше в гранитных, гнейсовых и щелочных породах, широко представленных в Северной Европе. Выщелачивание радионуклидов из этих пород является основным фактором, ответственным за перенос тория в водную среду в северной Европе. Поэтому высокие значения в воде наблюдались также в Северной Ирландии и Шотландии, в Каледонидах и в центральной Франции. В Северной Ирландии высокие концентрации тория связаны также с наличием гранитов Morne [44].

Относительно низкие значения концентрации ^{232}Th в поверхностных водах, полученных в Европе в рамках проекта FOREGs по сравнению с другими данными табл. 3, можно объяснить тем, что целью проекта было измерение концентрации тория в фильтрованной воде (размер пор <45 мкм). Другие исследования, представленные в этой таблице, дают суммарную концентрацию тория в пробах воды, включая торий, сорбированный на взвешках.

В работе [49] представлены данные о содержании изотопов тория в реках центральной Португалии. Граниты центральных областей Португалии известны своим высоким содержанием урана, и до 2001 г. в этом районе действовало несколько предприятий по добыче урана. В ходе эксплуатации жидкие отходы, содержащие уран и торий (а также продукты их распада), в течение длительного времени поступали в реки этого региона, формируя повышенные уровни содержания этого радионуклида в водном стоке. Вынос радионуклидов из хвостохранилищ и открытых карьеров также способствовал повышенной концентрации изотопов тория в воде и донных отложениях в этом регионе.

Данные по концентрациям тория в водном стоке региона добычи редкоземельных элементов представлены в работе [46]. В рамках этих исследований были измерены концентрации изотопов урана и тория в семнадцати реках в штате Паханг (Малайзия). Средние концентрации в исследованных реках варьировали от $(0.48 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ Бк/л до $(6.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ Бк/л при среднем значении кон-

Таблица 3. Концентрации ^{232}Th в поверхностных водах (мБк/л)
Table 3. ^{232}Th concentrations in surface water (mBq/l)

Страна	^{232}Th	Диапазон	Ссылка
Австралия	$7.8 \pm 8.2 (2.2 \pm 3.2)^1$		[42]
Азербайджан (р. Кура)	<0.041		[43]
Европа	0.37^1	0.08–1.5	[44]
Ирак ²	$(0.33 \pm 0.05) \times 10^3$	0.3–0.7	[45]
Ирак (Сифуйя)	$(7.4 \pm 0.5) \times 10^3$	1.0–8.0	[45]
Ирак (о. Мосул)	$(4.1 \pm 0.4) \times 10^3$	0.7–6	[45]
Норвегия (пр. Фен)	0.33 ± 0.23		[28]
Малайзия (Паханг)	1.74 ± 0.27	0.48–6.2	[46]
Малайзия	1.5	1.2–7.0	[47]
Марокко (р. Умм-эр-Рбия)	5.0 ± 0.98	3.6–10.0	[48]
Нигерия (р. Басиши)	0.25 ± 0.02		[13]
Португалия (р. Дао, Тавора, Монтего)	1.5 ± 0.67	0.2–0.65	[49]
Португалия (р. Вуга)	0.38 ± 0.15	0.2–1.5	[49]
Румыния (р. Дунай)	3.6	$<1-10$	[50]
Румыния (р. Олт)	7	4.–11	[50]
Страны Балтии		0.1–5.0	[2]
Тайвань (р. Пейту)	$0.2 \pm 0.05-13.0 \pm 20$		[51]
США (озеро Моно)	25.9		[52]

¹Данные для фильтрованной воды <0.45 мкм даны в скобках. Отбор в 815 точках.

²Водотоки, прилегающие к местам добычи нефти к северо-востоку от г. Мосул.

центрации ^{232}Th в водах региона (1.74 ± 0.27) $\times 10^{-3}$ Бк/л [46].

Концентрации тория в реках и соотношение между изотопами тория существенно различались в зависимости от расстояния от мест добычи урана. Так, концентрации ^{230}Th в воде (3.1 ± 2.2) $\times 10^{-3}$ Бк/л рек Дао, Тавора, Монтего, протекающих в районе с повышенным содержанием тяжелых естественных радионуклидов, были примерно в 2 раза выше, чем в р. Вуга, протекающей вне этого региона (табл. 3). Отношения концентраций в воде ^{230}Th к ^{232}Th варьировали от 1.2 до 12.0 для рек Дао, Тавора, Монтего и 2.9–5.0 для р. Вуга. Отмечено, что изотопы тория в значительной степени связаны с частицами, взвешенными в воде.

Чу и Ванг изучили распределения изотопов тория в речной системе бассейна реки Пейту в северной части Тайваня [51]. Три основных притока, а именно Вайшуан, Наньхуан и Хуанкан, протекающие в бассейне р. Пейту, впадают в Тайваньский пролив через р. Тамсуи. Концентрации ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th в речной и родниковой воде составляли $(0.05-44.0) \times 10^{-3}$, $(0.09-39.0) \times 10^{-3}$, $(0.19-342.0) \times 10^{-3}$ Бк/л соответственно. Эти значения были примерно в 2 раза ниже, чем для геотермальных вод (горячих источников). Распределение

изотопов тория в речной и родниковой воде сильно зависело от pH. Соотношения концентраций $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ в речной и горячей родниковой воде варьировали от 1.4 до 19.0 и от 1.5 до 8.8 соответственно. Высокие значения отношения концентраций $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ показали, что эффект отдачи (gecoil) и обогащение ^{228}Ra по сравнению с ^{232}Th были основными процессами, приводящими к повышению концентрации ^{228}Th в водной среде.

Концентрации ^{232}Th в водах региона Фен в Норвегии варьировали от 0.15×10^{-3} до 0.76×10^{-3} Бк/л со средним значением 0.33 и стандартным отклонением 0.23×10^{-3} Бк/л. Относительно высокие концентрации тория в воде в значительной степени обусловлены выщелачиванием ^{232}Th и смыванием радионуклидов из окружающих областей, которые богаты ^{232}Th [15].

Диапазон колебаний концентраций ^{232}Th в поверхностных водах Австралии достаточно близок к диапазону, отмеченному для Европы. Концентрация ^{232}Th в нефилтрованной воде варьировала от $(0.11 \pm 0.03) \times 10^{-3}$ Бк/л до $(7.8 \pm 8.2) \times 10^{-3}$ Бк/л. Концентрация ^{232}Th в фильтрованной воде (<45 мкм) была в 4–5 раз ниже, показывая, что большая часть ^{232}Th была связана с находящими-

Таблица 4. Концентрации ^{232}Th в донных отложениях, Бк/кг сухого вещества
Table 4. ^{232}Th concentrations in bottom sediments, Bq/kg (dry mass)

Страна	Местоположение/водоем	^{232}Th	Диапазон	Ссылки
Австралия	Река Аллигатор		31–185	[42]
Бразилия	Река Соберо, хранилище отходов	100	10–700	[61]
Бразилия	Река Соберо	10	3–60	[61]
Европа	807 мест отбора проб по Европе	41	4–1000	[62]
Малайзия	Район добычи олова	(170–250)	44–639	[46]
Португалия	Реки Дао, Тавора, Монтего	264 ± 167	70–500	[49]
Португалия	Река Вуга	143 ± 40	70–170	[49]
Испания	Галисия, Виго Риа	38 ± 20	1–62	[31]
Испания	Река Мадерос	66	44–112	[63]
Среднее по литературным данным		35.8 ± 23	6.9–409	[64]

ся в воде взвешенными частицами. Соотношение концентраций активности ^{230}Th и ^{232}Th составило 1.0–2.8, что показывает вклад сбросов в водную среду предприятий по добыче урана в загрязненные пресноводных ресурсов в регионе.

Примером поверхностных вод с аномально высоким содержанием изотопов тория является и сильнощелочное (pH ~ 10) оз. Моно, расположенное примерно в 20 км к востоку от национального парка Йосемити в Калифорнии. Концентрации активности ^{228}Th , ^{230}Th и ^{232}Th в этом озере достигают 37.8×10^{-3} , 52.2×10^{-3} и 25.9×10^{-3} Бк/л соответственно, что намного выше, чем в морской воде [52–54].

Вариабельность ^{232}Th в водной среде связана как собственно с гидрохимическими характеристиками воды, так и с присутствием в воде комплексообразующих химических агентов, влияющих на растворимость тория и его сорбцию на взвешях. Так, состав коллоидной фракции воды может быть основным фактором, определяющим перенос тория в водной среде. Соотношение активности $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ в поверхностных водах, по видимому, также зависит от литологии водораздела. Реки, дренирующие карбонаты, как правило, имеют более высокие отношения $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$, чем те, в которых торий вымывается из силикатных пород. Главным образом это происходит из-за более высоких отношений $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ в карбонатных породах по сравнению с силикатными породами [55–58]. Полученные данные по содержанию изотопов тория, растворенных в воде (полученных с помощью фильтра с порами <0.2 мкм), указывает на общую тенденцию к снижению концентрации тория с увеличением значений pH воды [58].

ТОРИЙ В ГРУНТОВЫХ ВОДАХ

Концентрации тория в грунтовых водах, как правило, достаточно низки и варьируют от 0.6×10^{-7} до 1.0×10^{-4} Бк/л [59]. Когда вода проходит через материал водоносного горизонта, концентрация изотопов тория в грунтовых водах изменяется под воздействием различных процессов, которые включают выщелачивание, альфа-отдачу, осаждение/совместное осаждение, ионный обмен и адсорбцию/десорбцию. Концентрация тория в грунтовых водах, которые просачиваются через породы, богатые торием, как правило, на порядок выше, особенно если они обогащены сульфатами, фторидами, нитратами, фосфатами, карбонатами или органическими веществами. Воды с низким pH (pH < 3) могут содержать до 0.4 Бк/л тория, а воды, заполненные щелочными карбонатами при pH 8–10, могут содержать до 0.28 Бк/л и более. Концентрации ^{234}Th в подземных водах из разных регионов в окислительных водах колеблются от 0.2 до 2.4 Бк/л [60]. Высокие значения ^{234}Th , как правило, обусловлены высокой концентрацией ^{238}U [60]. Суммарные концентрации ^{232}Th в воде (включая растворенные формы + + твердые частицы размером <0.45 мм) значительно выше, чем в растворенной фазе, что связано с наличием в воде мелких терригенных глин [59, 60].

ТОРИЙ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Данные по концентрациям тория в донных отложениях рек представлены в табл. 4. Видно, что концентрации тория в донных осадках на три–пять порядков выше, чем концентрации тория в проточной воде, демонстрируя высокую способность тория к сорбции в донных отложениях рек и озер.

Таблица 5. Концентрации изотопов тория в донных отложениях реки Мадерос (Бк/кг, сухого вещества) [66]
Table 5. Mean values and ranges of the activity concentrations (Bq/kg, dry mass) for the thorium isotopes in sediments of the Maderos river [66]

Место отбора проб	²²⁸ Th		²³⁰ Th		²³² Th	
	среднее	диапазон	среднее	диапазон	среднее	диапазон
До шахты	27	24–30	131	65–231	18	15–20
<i>На уровне сброса шахтных вод</i>	27	20–33	255	225–323	17	15–19
<i>0.5 км ниже точки сброса</i>	32	20–47	5915	4662–6897	23	18–25
4 км ниже точки сброса	23	15–27	76	50–96	16	12–19
6 км ниже точки сброса	40	25–72	66	44–112	19	15–26
Водохранилище 10 км ниже шахты	40	30–47	75	55–100	43	31–63

Примечание. Данные, относящиеся к загрязненной части реки, показаны курсивом.

Данные об изотопах тория в донных отложениях рек весьма ограничены. В частности, Хосейни [64], основываясь на обзоре доступных публикаций [54, 69–72], предоставил значения 51 ± 20 ; 291 ± 106 и 35.8 ± 23 Бк/кг как глобальную оценку средних концентраций изотопов ²²⁸Th, ²³⁰Th и ²³²Th в донных отложениях. Как пример содержания тория в донных отложениях водоемов территорий с повышенным содержанием тория Назриан [47] опубликовал данные о концентрациях активности тория в воде (16 ± 2) Бк/л и донных отложениях (252 ± 45) Бк/кг в пробах, взятых рядом с хранилищем отходов добычи олова в Малайзии. В целом эти данные показывают, что концентрации ²³²Th в пробах донных отложений намного выше, чем в воде, что подтверждает высокую степень сорбции тория донными отложениями.

Концентрация ²³⁰Th в донных отложениях рек Португалии, упомянутых ранее, составляла $(4.9 \pm 3.5) \times 10^2$ Бк/кг, тогда как для р. Вуга, протекающей за пределами региона с высоким содержанием урана в почве, средняя концентрация ²³⁰Th составила $(1.6 \pm 1.2) \times 10^2$ Бк/кг, т.е. была примерно в 3 раза ниже, чем для рек ториевого района [49].

Данные по концентрации тория в донных отложениях, представленные в Геохимическом атласе Европы, полученные в рамках проекта FOREG [62], показывают, что наиболее низкая концентрация тория в донных отложениях рек (28 Бк/кг и ниже) отмечается в зоне ледникового шельфа Северной Европы, от Нидерландов до Польши. Низкие концентрации тория в отложениях водоемов и водотоков также отмечены в центральной Норвегии, северной и восточной Финляндии, южной Швеции, западной Ирландии, юго-восточной Испании, долине р. По в северной Италии и в большинстве районов Греции [62].

Более высокие концентрации тория, превышающие значение 50 Бк/кг, отмечены в северной

Португалии и Испании и в Центральном массиве во Франции. Высокие значения концентрации тория в отложениях были также обнаружены в западных Альпах, Богемском массиве, на юге Италии и Сицилии, на северо-востоке Греции (связан с гранитной и U-минерализацией), на севере Эстонии, юге Финляндии и южной части Норвегии. Сравнение данных этого проекта для концентраций активности тория в донных отложениях, почве и воде, представленных в публикациях [21], [44] и [62], показывает, что пространственные закономерности распределения тория в почве и донных отложениях довольно близки, но отличаются от таковых в поверхностных водах.

В последние годы было проведено несколько исследований поведения радионуклидов продуктов деления урана в зонах, подверженных воздействию урановых рудников [61, 63–67]. Лозано представил результаты исследований, демонстрирующие влияние сбросов предприятия по добыче урана на содержание изотопов тория в донных отложениях р. Мадерос в регионе Эстремадура на юго-западе Испании (табл. 5) [66]. В публикации [66] также представлены данные для ²²⁸Th и ²³⁰Th, показывающие изотопные различия в пробах донных отложений, отобранных вдоль русла р. Мадерос.

Концентрации всех изотопов тория в донных отложениях, взятых вверх по течению от шахты, также довольно высоки, так как река собирает поверхностные воды со всей площади водосбора, на котором находится шахта. Содержание ²²⁸Th и ²³²Th незначительно превышает содержание этих радионуклидов в донных отложениях, загрязненных шахтными водами. В то же время концентрации ²³⁰Th в загрязненной части русла р. Мадерос достигают значений, значительно превышающих 5.0×10^3 Бк/кг (сухой вес). Так, хотя отношение ²²⁸Th к ²³²Th остается примерно на одном уровне (в диапазоне от 27 до 40), отношения ²³⁰Th к ²³²Th изменяются от 2 до 253 (наибольшее значение по-

лучено для точек отбора немного ниже сброса шахтных вод), что ясно показывает воздействие добычи урана на изменение содержания тория в водной среде [63–66]. В то же время влияние сбросов урановых шахт на изменение содержание тория в водных системах пространственно ограничено и носит локальный характер, что связано с высокой сорбцией тория донными отложениями [64–67].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средние концентрации ^{232}Th в почвах изменяются в широких пределах, отражая его концентрации в подстилающих породах. Из-за большого радиуса ионов торий обладает способностью концентрироваться в поздних кристаллизующихся породах. Вследствие этого в регионах добычи редкоземельных элементов или олова содержание тория в почвах, атмосфере и поверхностных водах может достигать довольно высоких величин.

Поступление тория в атмосферу может происходить как из природных, так и из антропогенных источников. Концентрация изотопов тория в приземном слое атмосферы носит сезонный характер, зависит от метеорологических условий, а также от размера, плотности и химической формы частиц, содержащих торий.

Вода является основной средой, определяющей перенос тория в окружающей среде. Концентрации тория в поверхностных водах обычно довольно низки, при этом наиболее высокие значения наблюдаются в регионах с повышенным содержанием тория в материнских породах, а также в районах добычи урана, олова и редкоземельных элементов. В целом пространственные закономерности содержания тория в почве и донных отложениях довольно близки и отличаются от закономерностей распределения тория в поверхностных водах. В поверхностных водах торий может находиться в растворенной, коллоидной формах, а также может быть сорбированным на взвешенном твердом веществе. Концентрация растворенного тория в воде обусловлена образованием растворимых комплексов с карбонатами, гуминовыми кислотами или органическими лигандами. Концентрации тория в донных отложениях на три–пять порядков выше, чем концентрации тория в поверхностных водах, показывая высокую способность взвешенных частиц и донных отложений к сорбции тория в водной среде. Вследствие этого влияние сбросов тория на водные системы довольно локализовано и прослеживается на расстоянии до нескольких километров от места сброса.

Концентрации изотопов тория в регионах с нормальным радиационным фоном довольно

низки и торий в большинстве случаев не оказывает высокого радиационного воздействия на человека и биоту. В то же время в районах с повышенным радиационным фоном или в районах добычи некоторых металлов, фосфатов, урановой и ториевых руд содержание тория может достигать достаточно больших величин и влиять на состояние биологических объектов, оказывая существенное как радиационное, так и токсикологическое воздействие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boyle RW. Geochemical prospecting for thorium and uranium deposits. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 1982. 498 p.
2. Алексахин П.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М. и др. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биогеоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с. [Alexakhin R.M., Arkhipov N.P., Barkhudarov R.M., et al. Heavy Natural Radionuclides in Biosphere: Migration and Biological Effects on Population and Biogeocenoses. М.: Nauka, 1990. 368 p. (In Russian)]
3. Mernagh T.P., Miezitis Y. A Review of the Geochemical Processes Controlling the Distribution of Thorium in the Earth's Crust and Australia's Thorium Resources. Geoscience Australia, Australian Government, Record 2008/05 (2008). Available at: https://www.academia.edu/685828/A_Review_of_the_Geochemical_Processes_Controlling_the_Distribution_of_Thorium_In_the_Earths_Crust_and_Australias_Thorium_Resources. Accessed July 10, 2019.
4. Mukherjee T.K. "Processing of Indian Monazite for the recovery of thorium and uranium values", Characterization and Quality Control of Nuclear Fuels (CQCNF-2002), (Proc. Int. Conf., 2002, Hyderabad). New Delhi, India: Allied Publishers, 2003.
5. Kleinschmidt R. Reference natural radionuclide concentrations in Australian soils and derived terrestrial air kerma rate // J. Environ. Radioact. 2017. V. 172. P. 160–162.
6. Freitas A.C., Alencar A.S. Gamma dose rates and distribution of natural radionuclides in sand beaches-Ilha Grande, Southeastern Brazil // J. Environ. Radioact. 2004. V. 7. P. 211–223.
7. Sheppard S.C., Sheppard M.I., Ilin M. et al. Primordial radionuclides in Canadian background sites: secular equilibrium and isotopic differences // J. Environ. Radioact. 2008. V. 99. P. 933–946.
8. Skoko B., Marovi G., Babi D. Radioactivity in the Mediterranean flora of the Kastela Bay, Croatia // J. Environ. Radioact. 2014. V. 135. P. 36–43.
9. Christa E.P., et al. Radiation dose in the high background radiation area in Kerala, India // Radiat. Prot. Dosim. 2012. V. 148. №4. P. 482–486.
10. Uchida S., Tagami K., Hirai I. Soil-to-plant transfer factors of stable elements and naturally occurring radionuclides: (2) Rice collected in Japan // J. Nucl. Sci. Technol. 2007. V. 44. P. 779–790.
11. Al-Kharouf S.J., Al-Hamarneh I.F., Dababneh M. Natural radioactivity, dose assessment and uranium

- uptake by agricultural crops at Khan Al-Zabeeb, Jordan // *J. Environ. Radioact.* 2008. V. 99. P. 1192–1199.
12. *Oufni L., Taj S., Manaut B., Eddouks M.* Transfer of uranium and thorium from soil to different parts of medicinal plants using SSNTD // *J. Radioanalit. Nucl. Chem.* 2011. V. 287. P. 403–410.
 13. *Arogunjo A.M., et al.* Uranium and thorium in soils, mineral sands, water and food samples in a tin mining area in Nigeria with elevated activity // *J. Environ. Radioact.* 2009. V. 100. P. 232–240.
 14. *Ibeanu I.G.E.* Tin mining and processing in Nigeria: cause for concern? // *J. Environ. Radioact.* 2003. V. 64. P. 59–66.
 15. *Dowdall M., et al.* Assessment of the radiological impacts of historical coal mining operations on the environment of Ny-Ålesund, Svalbard // *J. Environ. Radioact.* 2004. V. 71. P. 101–114.
 16. *Marmolejo-Rodriguez A.J., Caetano M., Prego R., Vale C.* Thorium accumulation in the sedimentary environment of the Vigo Ria (NW Iberian Peninsula) // *J. Environ. Radioact.* 2008. V. 99. P. 1631–1635.
 17. *Evans S., Eriksson Å.* Uranium, Thorium and radium in soil and crops - calculations of transfer factors. Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Radioecology, June 1983.
 18. *Kritsanuwat R., Sahoo S.K., Arae H., Fukushi M.* Distribution of ^{238}U and ^{232}Th in selected soil and plant samples as well as soil to plant transfer factors around Southern Thailand // *J. Radioanalit. Nucl. Chem.* 2015. V. 303. P. 2571–2577.
 19. *Ibrahim S.I., Whicker W.* Comparative uptake of U and Th by native plants at a U production site // *Health Phys.* 1987. V. 54. № 4. P. 413–419.
 20. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes, Annex B. New York: UNCEAR, 2000. P. 84–156.
 21. *De Vos W. and Tarvainen T.* (Chief eds). Distribution of elements in subsoil and topsoil. Geochemical Atlas of Europe, Part 2, Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Maps and Related Publications. A contribution to IUGS/IAGC Global Geochemical Baselines, EuroGeoSurveys, (2006). ISBN 951 690 960 4. Available at: weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/part2.php. Accessed July 10 2019.
 22. *Chen S.B., Zhu Y.G., Hu Q.H.* Soil to plant transfer of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th on a uranium mining-impacted soil from south-eastern China // *J. Environ. Radioact.* 2005. V. 82. P. 223–236.
 23. *Sartandel S.J., et al.* Spatial distribution of uranium and thorium in the surface soil around proposed uranium mining site at Lambapur and its vertical profile in the Nagarjuna Sagar Dam // *J. Environ. Radioact.* 2009. V. 100. P. 831–834.
 24. *Jha S.K.* Intake of ^{238}U and ^{232}Th through the consumption of foodstuffs by tribal populations practicing slash and burn agriculture in an extremely high rainfall area // *J. Environ. Radioact.* 2012. V. 103. P. 1–6.
 25. *Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y., Aliyu A.S.* Assessment of environmental ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 124. P. 130–140.
 26. *Lee S.K. et al.* Radiological monitoring: terrestrial natural radionuclides in Kinta District, Perak, Malaysia // *J. Environ. Radioact.* 2009. V. 100. P. 368–374.
 27. *Ramli A.T., Wahab A., Hussein M.A., Wood A.K.* Environmental ^{238}U and ^{232}Th concentration measurements in an area of high level natural background radiation at Palong, Johor, Malaysia // *J. Environ. Radioact.* 2005. V. 80. P. 287–304.
 28. *Popic J.M., Salbu B., Strand T., Skipperud L.* Assessment of radionuclide and metal contamination in a thorium rich area in Norway // *J. Environ. Monitoring.* 2011. V. 13. P. 1730–1738.
 29. *Amaral E.C.S., Rochedo E.R.R., Paretzke H.G., Franca E.P.* The radiological impact of agricultural activities in an area of high natural radioactivity // *Radiat. Prot. Dosim.* 1992. V. 45. P. 289–292.
 30. *Hinton T.G., Knox A.S., Kaplan D.I., Sharitz R.* Phytoextraction of uranium and thorium by native trees in a contaminated wetland // *J. Radioanalit. Nucl. Chem.* 2005. V. 264. № 2. P. 417–422.
 31. *Martinez-Aguirre A., Garcia-Orellanab I., Garcia-Leon M.* Transfer of Natural Radionuclides from Soils to Plants in a Marsh Enhanced by the Operation of Non-Nuclear Industries // *J. Environ. Radioact.* 1997. V. 35. P. 149–171.
 32. *Fruchter J.S., et al.* Mount St. Helens ash from the 18 May 1980 eruption: chemical, physical, mineralogical, and biological properties // *Sci.* 1980. V. 209. P. 1116–1125.
 33. *Kuroda P., Barbod T., Bakhtiar S.* Effect of the eruptions of Mount St. Helens and Elchichon on the ratios of thorium and uranium isotopes in rain // *J. Radioanalit. Nucl. Chem.* 1987. V. 111. P. 137–143.
 34. *Kolb W.* Seasonal fluctuations of the uranium and thorium contents of aerosols in ground-level air // *J. Environ. Radioact.* 1989. V. 9. P. 61–75.
 35. *Hirose K., Sugimura Y.* Thorium isotopes in the surface air of the western North Pacific Ocean // *J. Environ. Radioact.* 1987. V. 5. P. 459–475.
 36. *Hirose K., Igarashi Y., Aoyama M., Inomata Y.* Depositional behaviour of plutonium and thorium isotopes at Tsukuba and Mt. Haruna in Japan indicate the sources of atmospheric dust // *J. Environ. Radioact.* 2010. V. 101. P. 106–112.
 37. *Zoller W.H., Gladney E.S., Duce R.A.* Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole // *Sci.* 1974. V. 183. P. 198–200.
 38. *Hirose K., Kilkawada Y., Igarashi Y.* Temporal variation and provenance of thorium deposition observed at Tsukuba, Japan // *J. Environ. Radioact.* 2012. V. 108. P. 24–28.
 39. *Baeza A., Rodríguez-Perulero A., Guillen J.* Anthropogenic and naturally occurring radionuclide content in near surface air in Caceres (Spain) // *J. Environ. Radioact.* 2016. V. 165. P. 24–31.

40. *Pourcelot L., et al.* Environmental consequences of uranium atmospheric releases from fuel cycle facility: II. The atmospheric deposition of uranium and thorium on plants // *J. Environ. Radioact.* 2015. V. 141. P. 1–7.
41. *Masson O., Pourcelot L., Boulet B. et al.* Environmental releases from fuel cycle facility: Part 1: radionuclide re-suspension vs. stack releases on ambient airborne uranium and thorium levels // *J. Environ. Radioact.* 2015. V. 141 P. 146–152.
42. *Ryan B., Bollhofer A., Martin P.* Radionuclides and metals in freshwater mussels of the upper South Alligator River, Australia // *J. Environ. Radioact.* 2008. V. 99. P. 509–526.
43. *Ahmadov M.M., Humbatov F.Y., Balayev V.S., Suleymanov B.A.* Uranium and thorium determination in water samples taken along river Kura // *J. Mater. Sci. Engineer.* 2016. V. B6. № 3–4. P. 80–84.
44. *De Vivo B., et al.* Distribution of elements in stream water, Geochemical Atlas of Europe, Part 2, Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Maps and Related Publications. A contribution to IUGS/IAGC Global Geochemical Baselines, EuroGeoSurveys, 2006. ISBN 951 690 960 4. Available at: weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/part2.php. Accessed July 10 2019.
45. *Ali Ah., Mheemeed A.K., Hassan H.I.* Concentration measurements of uranium, thorium and their daughter products in water produced from and near oil fields in north of Iraq using SSNTRD's passive method // *J. Radioanalyt. Nucl. Chem.* 2015. V. 303. P. 959–965.
46. *Gabdo H.T., Ramli A.T., Luka I.G.* Uranium-thorium concentration in river water a case study of Pahang state Malaysia: Proc. of 14th ISERD Int. Conf., Kuala Lumpur, Malaysia, 16th October 2015. P. 60–63.
47. *Nasirian M., Bahari I., Abdullah P.* Assessment of natural radioactivity in water and sediment from Amang (tin tailing) processing ponds // *Malaysian J. Analyt. Sci.* 2008. V. 12. № 1.
48. *Amrane M., Oufni L.* Determination for levels of uranium and thorium in water along Oum Er-Rabia river using alpha track detectors // *J. Radiat. Res. Appl. Sci.* 2017. V. 10. P. 246–251.
49. *Carvalho F.P., Oliveira J.M., Lopes I., Batista A.* Radionuclides from past uranium mining in rivers of Portugal // *J. Environ. Radioact.* 2007. V. 98. P. 298–314.
50. *Paunescu N.* Determination of uranium and thorium concentration in natural waters // *J. Radioanalit. Nucl. Chem.* 1986. V. 104. P. 209–216.
51. *Chu T.-C., Wang J.-J.* Radioactive Disequilibrium of Uranium and Thorium Nuclide Series in Hot Spring and River Water from Peitou Hot Spring Basin in Taipei // *J. Nucl. Radiochem. Sci.* 2000. V. 1. № 1. P. 5–10.
52. *Anderson R.F., Bacon M.P., Brewer P.G.* Elevated concentrations of actinides in Mono Lake // *Sci.* 1982. V. 216.
53. *Anderson P.S., Wasserburg G.J., Chen J.H., Papanastassiou D.A.* ^{238}U – ^{224}U and ^{232}Th – ^{230}Th in the Baltic Sea and in river water // *Eart. Planet. Sci. Lett.* 1995. V. 139. P. 217–234.
54. *Simpson H.J., et al.* Radionuclides in Mono Lake // *California Sci.* 1982. V. 216 P. 340–345.
55. *Porcelli D., Andersson P.S., Baskaran M., Wasserburg G.J.* The transport of U- and Th-series nuclides in a Baltic watershed and the Baltic Sea // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2001. V. 65. P. 2439–2459.
56. *Vigier N., Bourdon B., Turner S., Allegre C.J.* Erosion timescales derived from U-decay series measurements in rivers // *Eart. Planet. Sci. Lett.* 2001. V. 193. P. 549–563.
57. *Dosetto A., Turner S., Douglas G.B.* Uranium-series isotopes in colloids and suspended sediments: timescale for sediment production and transport in the Murray-Darling River system // *Eart. Planet. Sci. Lett.* 2006. V. 246. 418–431.
58. *Chabaux F., Bourdon B., Riotte J.* “U-Series Geochemistry in Weathering Profiles, River Waters and Lakes”, in U-Th series nuclides in aquatic systems / Ed. S. Krishnaswami. JK Cochran 13. 2008. P. 49–104.
59. *Zapeczka O.S. and Szabo Z.* Natural Radioactivity in Ground Water. A Review, p. 50–57 in National Water Summary, 1986. Hydrologic Events and Ground-Water Quality, Water-Supply, Paper 2325. U.S. Geological Survey, Reston, VA, 1988.
60. *Hussain N., Krishnaswami S.* U-238 series radioactive disequilibrium in groundwaters: implications to the origin of excess U-234 and fate of reactive pollutants // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1980. V. 44. P. 1287–1291.
61. *Fernandes H.M., Franklin M.R., Veiga L.H.S. et al.* Management of uranium mill tailing: geochemical process and radiological risk assessment // *J. Environ. Radioact.* 1996. V. 30. P. 69–95.
62. *De Vos W.* Distribution of elements in stream sediment, Geochemical Atlas of Europe, Part 2, Interpretation of Geochemical Maps, Additional Tables, Maps and Related Publications. A contribution to IUGS/IAGC Global Geochemical Baselines, EuroGeoSurveys, (2006). ISBN 951 690 960 4. Available at: weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/part2.php. Accessed, July 10 2019.
63. *Lozano J.C., Blanco Rodriguez P., Vera Tome F.* Distribution of long-lived radionuclides of the ^{238}U series in the sediments of a small river in a uranium mineralized region of Spain // *J. Environ. Radioact.* 2002. V. 63. P. 153–171.
64. *Hosseini A., et al.* Background dose-rates to reference animals and plants arising from exposure to naturally occurring radionuclides in aquatic environments // *J. Radiol. Prot.* 2010. V. 30. P. 235–241.
65. *Krizman M., Byrne A.R., Benedik L.* Distribution of ^{230}Th in milling waste from the Zirovskivrh uranium mine (Slovenia), and its radioecological implications // *J. Environ. Radioact.* 1995. V. 26. P. 223–235.
66. *Lozano J.C., Vera Tome F., Gomez Escobar V., Blanco Rodriguez P.* Radiological characterization of a uranium mine with no mining activity // *Appl. Radiat. Isotop.* 2000. V. 53. P. 337–343.
67. *Jurado Vargas M., Vera Tome F., Martin Sanchez A. et al.* Distribution of uranium and thorium in sediments and plants for a granitic fluvial area // *Appl. Radiat. Isotop.* 1997. V. 48. P. 1137–1143.

Thorium Concentrations in the Environment: A Review of the World Data

S. V. Fesenko^{a,#} and E. S. Emlutina^a

^a *Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

[#] *E-mail: Corwin_17F@mail.ru*

A review of the world data on the thorium activity concentrations in soils, the atmosphere, surface waters, and bottom sediments is presented. It was shown that ²³²Th concentrations in the soil of regions with a normal radiation background vary from 5 to 95 Bq/kg, in the aquatic environment from 0.01 to 10.0 mBq/l, in bottom sediments of surface waters from 4 to 100 Bq/kg, and groundwater from 0.6×10^{-7} Bq/l to 1.0×10^{-4} Bq/l, and in the atmosphere from 0.1 to 1×10^{-4} Bq/m³. In areas with elevated radiation background and area of thorium mining, in regions of the rare earth elements, or tin, the concentration of thorium in environment can be from one to four orders of magnitude higher than those in areas of normal background radiation. It is also demonstrated that the use of data on the violation of the isotopic equilibrium of thorium content in various media can be used to assess the pathways of thorium release into the environment. It is noted that the spatial patterns of thorium concentrations in soil and bottom sediments are quite close and differ from the patterns of thorium distribution in surface waters.

Keywords: thorium, uranium, natural environments, data review, soil, surface water, bottom sediments, atmosphere