

УДК 546.795:631.4:58.009:550.42

СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В РАСТЕНИЯХ: ОБЗОР МИРОВЫХ ДАННЫХ

© 2022 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 13.12.2021 г.

После доработки 10.04.2022 г.

Принята к публикации 27.04.2022 г.

Представлен обзор доступных данных о концентрации тория в растениях и соответствующих пищевых продуктах. Показано, что концентрация ^{232}Th в растениях в регионах с нормальным радиационным фоном варьирует от 0.5×10^{-5} до 22.8 Бк/кг, в то время как в регионах с повышенными концентрациями тория в окружающей среде находится в диапазоне от 0.058 до 80 Бк/кг (сухой вес). Распределение тория между органами растений неоднородно. Отмечена роль корневых систем как биологического барьера для проникновения тория в растения.

Ключевые слова: торий, уран, растения, обзор данных, коэффициент перехода

DOI: 10.31857/S086980312204004X

Торий может поступать в окружающую среду как из природных, так и из антропогенных источников. Как и для других радионуклидов природного происхождения, самыми крупными природными источниками тория являются вулканические извержения, лесные пожары и ветровой захват частиц почвы [1, 2]. Различные виды деятельности человека, такие как добыча олова, урана и тория, измельчение и переработка руды, производство фосфатных удобрений, а также выброс тория в атмосферу при сжигании органического топлива, являются основными антропогенными источниками тория в атмосфере [2].

Важным, хотя и во многих случаях неосновным источником тория при его переходе в растения является почва [1]. Выпадения радионуклидов из атмосферы и последующее поверхностное загрязнение растений также имеют большое значение и могут значительно влиять на содержание тория в растительности [2, 3]. Другие источники загрязнения растений, такие как ирригация, также могут внести определенный вклад в поступление тория в растения, хотя их вклад обычно имеет второстепенное значение. Значимость путей загрязнения зависит от множества факторов окружающей среды, регулирующих биологическую доступность тория в почве, интенсивности ветрового подъема и концентрации тория в воде, используемой для орошения [1–3].

Изотопы тория обычно характеризуются довольно высокими значениями K_d в почве и низкими значениями коэффициентов накопления этого радионуклида растениями. У других тяжелых

естественных радионуклидов коэффициенты накопления растениями (K_p) обычно выше; на основе K_p тяжелые естественные радионуклиды могут быть представлены в виде ряда $^{210}\text{Po} \sim ^{210}\text{Pb} > ^{226}\text{Ra} > ^{238}\text{U} > ^{232}\text{Th}$ [1].

При оценке содержания ^{228}Th и ^{230}Th в растениях следует учитывать особенности поступления и преобразования этих изотопов в тканях растений, в частности роль их предшественников в цепочках радиоактивного распада. Так, в растениях кроме непосредственно тория содержатся дочерние продукты распада ^{238}U , которые при их распаде могут вносить дополнительный вклад в содержание ^{230}Th в тканях растений. Следует также отметить, что ^{228}Th поступает в растения не только из почвы, но и при распаде ^{228}Ac , который находится в растениях в равновесии с ^{228}Ra . Концентрации активности тория представлены для нормальных фоновых областей, т.е. для регионов с нормальной концентрацией тория, и для районов с уровнями тория в окружающей среде, которые либо были “нарушены” деятельностью человека, добычей урана, добычей урана и угля, включая регионы с высоким естественным ториевым фоном. Эти данные имеют определяющее значение при оценке роли естественного и антропогенного фона в формирование доз облучения человека и биоты. В то же время данные такого рода, полученные в каждой отдельной стране, очень ограничены, что и определяет необходимость обобщения мировых данных.

Ранее нами было выполнено обобщение мировых данных по концентрациям тория в природных средах: почвах, атмосфере, природных и грунтовых водах, а также в донных отложениях [3]. Представленные материалы, обобщают данные о закономерностях содержания тория в растениях. На следующем этапе планируется дополнить эти данные информацией о закономерностях перехода тория в организм животных и параметрах миграции тория в окружающей среде, завершая анализ данных по поведению тория в наземных экосистемах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрации тория в растениях, полученные в результате исследований, проведенных в регионах обычного ториевого фона, приведены в табл. 1, в то время как в табл. 2 представлены данные о концентрациях тория в регионах с высоким содержанием тория в окружающей среде, таких как Нигерия (район добычи олова), Малайзия (район добычи редкоземельных элементов), Индия и Турция (районы добычи тория). Высокие концентрации тория в растениях отмечены также на участках добычи урана и фосфатов, где вклад ^{230}Th , образующегося в результате цепочки распада ^{238}U , достаточно высок [2, 3]. Данные о концентрациях тория в растениях представлены как на основе сухого, так и на основе сырого вещества, поскольку значительная часть продукции растениеводства не высушивается перед потреблением.

Концентрации тория в растениях демонстрируют высокую изменчивость и варьируют от 0.5×10^{-5} до 2.8 Бк/кг для почв с нормальным фоном и от 0.058 до 80 Бк/кг (сухое вещество) для районов с высокими концентрациями тория в почве (ториевые провинции) и антропогенно-нарушенных территорий. К антропогенно-нарушенным территориям относятся районы, где велась добыча урана, тория, полиметаллических руд, а также минеральных удобрений (фосфаты).

Наиболее высокие значения содержания ^{232}Th отмечены для проб чебреца (тимьяна) (*Thymus vulgaris*), отобранных на территории со средними уровнями содержания тория в почве около $5.5 \times 10^3 \text{ Бк/кг}$ на сухой вес. Экстремально высокие уровни содержания ^{232}Th ($>10^4 \text{ Бк/кг}$) отмечены и в районе добычи олова в Нигерии (Бисичи). Отметим, что в обоих случаях содержание ^{232}Th в почвах на порядок больше, чем в большинстве других регионов с почвами, обогащенными торием.

В таблицах 1 и 2 данные представлены территориями с тропическим, субтропическим, сухим и континентальным климатом. Поскольку корневое поглощение изотопов тория растениями относительно невелико, в районах с засушливым

климатом внешнее загрязнение может иметь большое значение. Так, А.М. Arogunjo [30], изучая концентрации ^{232}Th в злаках в области повышенного ториевого фона в Нигерии, показал, что средняя концентрация ^{232}Th в немомытом рисе достигала $10.5 \pm 2.13 \text{ Бк/кг}$ (сырой вес), а для промытого риса аналогичные значения были в 2.5 раза ниже. Аналогичные результаты были получены в исследованиях S.I. Ibrahim, W. Whicker [34], в которых было отмечено, что концентрации тория в немомытых природных травах были в 2 раза выше по сравнению с растениями, где пробы растений промывались. Таким образом, вклад внешнего загрязнения растений торием в зонах с умеренным и сухим климатом может существенно превышать вклад корневого поступления, в отличие от территорий с повышенным увлажнением, в которых корневое поглощение может доминировать.

Значительных сезонных изменений содержания тория в растениях обнаружено не было. В то же время исследования, проведенные в Испании, показали, что повышенные концентрации ^{230}Th в листьях средиземноморских видов растений наблюдались весной и самые низкие осенью (во время листопада), в то время как для листьев деревьев самые высокие концентрации были обнаружены в старой биомассе [35, 36]. Более высокое накопление тория в старой биомассе наблюдалось также во многих других исследованиях [1].

Накопление тория во мхах и лишайниках

Полученные данные показывают, что концентрации тория во мхах и лишайниках находятся в диапазоне $4.1\text{--}22.8 \text{ Бк/кг}$, что выше, чем содержание этого элемента в травянистых и древесных растениях (табл. 1). Среднее геометрическое значение концентраций ^{232}Th в этой группе составило 10.3 Бк/кг (сухой вес).

Показано, что видовые особенности мхов и лишайников имеют важное значение с точки зрения задерживания тория из атмосферы. Так, S. Dragovic [17] представила данные по концентрациям ^{232}Th в 42 видах мхов с различными механизмами поглощения этого радионуклида из окружающей среды, которые находились в диапазоне $0.8\text{--}13.7 \text{ Бк/кг}$ (сухой вес). Наибольшие концентрации были обнаружены в гипновых мхах (*Hypnum cupressiforme*), тогда как самые низкие концентрации были в стелющихся мхах, таких как гилокомиум блестящий (*Hylocomium splendens*), отличающихся по морфологии. Таким образом, установлено, что первичное задерживание и поглощение мхом находящихся в воздухе твердых частиц значительно зависят от морфологии поверхности.

Более высокие концентрации активности ^{232}Th , составляющие $18\text{--}19 \text{ Бк/кг}$, отмечены в мхах и

Таблица 1. Концентрации тория в растениях: области с нормальным фоном, Бк/кг (сухой вес). Данные, приведенные на сырой вес, показаны курсивом
Table 1. Thorium concentrations in plants: areas with normal background, Bq/kg (dry). Data given in fresh weight are shown in *Italics*

Страна	Растения	^{232}Th	Ссылки
<i>Австралия</i>	<i>Фрукты</i>	2.6×10^{-4}	[4]
Бельгия	Пшеница (корни)*	0.6 ± 0.2	[5]
Бельгия	Пшеница (стебли)*	0.2 ± 0.04	[5]
Бельгия	Пшеница (зерно)*	0.05 ± 0.03	[5]
<i>Бразилия</i>	<i>Корнеплоды</i>	4.0×10^{-3}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Картофель</i>	9.0×10^{-4}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Пшеница (зерно)</i>	2.5×10^{-3}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Бобы</i>	1.2×10^{-2}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Листовые овощи</i>	1.1×10^{-3}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Нелистовые овощи</i>	1.4×10^{-3}	[6]
<i>Бразилия</i>	<i>Рис</i>	3.2×10^{-3}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Картофель</i>	9.8×10^{-4}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Фрукты (апельсины)</i>	3.5×10^{-3}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Фрукты (яблоки)</i>	8.0×10^{-5}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Фрукты (папайя)</i>	3.6×10^{-4}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Фрукты (ананас)</i>	3.0×10^{-4}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Овощи (капуста)</i>	5.0×10^{-5}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Овощи (цветная капуста)</i>	2.0×10^{-4}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Овощи (помидоры)</i>	1.1×10^{-3}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Овощи (лук)</i>	2.0×10^{-4}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Овощи (шпинат)</i>	1.6×10^{-2}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Бобы</i>	2.0×10^{-3}	[7]
<i>Бразилия</i>	<i>Листовые овощи</i>	1.2×10^{-3}	[7]
Хорватия	Травы*	0.99 ± 0.76	[9]
Хорватия	Кустарники*	0.64 ± 0.9	[9]
Хорватия	Деревья*	0.24 ± 0.15	[9]
СССР	Деревья (древесина)	0.18 ± 0.06	[10]
СССР	Деревья (листья)	1.8 ± 1.2	[10]
СССР	Деревья (кора)	2.4 ± 1.3	[10]
Индия	Рожь, кукуруза*	0.016 ± 0.003	[11]
Индия	Рис*	$(5.0 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	[11]
Индия	Листовые овощи*	0.04 ± 0.02	[11]
Индия	Корнеплоды*	0.04 ± 0.035	[11]
Индия	Фрукты*	4.0×10^{-3}	[11]
Индия	Пшеница (зерно)	1.1 ± 0.02	[12]
Индия	Пшеница (зерно)	0.16 ± 0.02	[12]
Марокко	Лечебные растения (корни)	2.5 ± 0.51	[13]
Марокко	Лечебные растения (листья)	1.8 ± 0.5	[13]
Марокко	Лечебные растения (плоды)	1.2 ± 0.4	[13]
Норвегия	Мхи	19	[14]

Таблица 1. Окончание

Страна	Растения	^{232}Th	Ссылки
Норвегия	Лишайники	18	[14]
Норвегия	Деревья (береза, ель)	0.08–0.036	[14]
Польша	Пшеница (мука)	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	[15]
Польша	Картофель	1.9 ± 0.06	[15]
Польша	Овощи	$(1.2 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	[15]
Польша	Листовые овощи	$(4.8 \pm 2.3) \times 10^{-3}$	[15]
Польша	Фрукты	$(1.6 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	[15]
Сербия	Лишайники	7.6	[16]
Сербия	Мох	4.1	[16]
Сербия	Мох	5.0 ± 2.8	[17]
Сербия	Природные травы	9.6	[18]
Сербия	Лишайники	22.8	[18]
Сербия	Кустарник	3.66	[18]
Сербия	Деревья	0.08	[18]
Словения	Смешанные травы	1.36 ± 0.05	[19]
Испания	Природные травы	1.3 ± 0.8	[20]
Таиланд	Овощи (9 видов)	0.84 ± 2.3	[21]
Таиланд	Рис (зерно)	$(5.0 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	[21]
Таиланд	Фрукты (6 видов)	0.03 ± 0.03	[21]
Англия	Природные травы*	0.6 ± 0.85	[22]
Англия	Сосна*	$(5.2 \pm 4.2) \times 10^{-2}$	[22]
США	Картофель	0.03	[23]
США	Овощи (тыква)	0.08	[23]
США	Травы	0.2	[23]
США	Смешанные травы	1.5 ± 0.4 – 1.9 ± 0.4	[24]
США	Тупело (листья)	0.13 ± 0.04	[25]
США	Амбровое дерево (листья)	0.17 ± 0.04	[25]
США	Початки кукурузы	0.043 ± 0.05	[27]
США	Кукурузный силос	0.12 ± 0.02	[26]
США	Люцерна – третий укос	0.15 ± 0.05	[26]
США	Люцерна – второй укос	0.06 ± 0.004	[26]
США	Природные травы (немые)	0.42 ± 0.04	[26]
США	Природные травы (отмытые)	0.14 ± 0.01	[26]

*Данные приведены для ^{228}Th .

лишайниках, отобранных в Норвегии [14]. В то же время среднее содержание тория во мхах, отобранных А.Т. Ramli [28] в районе добычи редкоземельных элементов, составляющее 9.5 Бк/кг, статистически не отличалось от средних значений, полученных для регионов с фоновым содержанием тория в окружающей среде.

Накопление тория в природных травах

Природные травы также известны как хорошие концентраторы радионуклидов. В работе [9]

приведены данные о концентрациях ^{232}Th в зоне со средиземноморским климатом для шести видов трав: липкая блошница, ситник острый, бес-смертник песчаный, рисовидка и тростник обыкновенный, которые варьировали от 0.16 до 2.1 Бк/кг (сухая масса). Полученные значения содержания тория в травянистой растительности примерно в 10 раз меньше, чем уровни содержания этого элемента в пробах мхов, оцененных для близкой по характеристикам территории в работе S. Dragovic [17].

Таблица 2. Концентрации тория в растениях: районы с высокой концентрацией тория в почве, Бк/кг (сухая масса)
Table 2. Thorium concentrations in plants: areas with high concentrations of thorium in soil, Bq/kg (dry mass). Data given in fresh weight are shown in *Italics*

Страна	Растения	²³² Th	Ссылки
<i>Австралия</i>	<i>Картофель</i>	0.03 ± 0.01	[4]
<i>Австралия</i>	<i>Фрукты (зеленая слива)</i>	(1.2 ± 0.8) × 10 ⁻¹	[4]
<i>Австралия</i>	<i>Фрукты (яблоко)</i>	(1.1 ± 0.5) × 10 ²	[4]
<i>Австралия</i>	<i>Фрукты (козья слива)</i>	(0.9 ± 0.2) × 10 ⁻¹	[4]
<i>Индия</i>	<i>Рис</i>	1.8 ± 0.1	[27]
<i>Индия</i>	<i>Пшеница</i>	1.7–1.8	[27]
<i>Индия</i>	<i>Турецкий горох</i>	0.2–2.0	[27]
<i>Индия</i>	<i>Чечевица</i>	0.3 ± 0.02	[27]
<i>Индия</i>	<i>Горох</i>	<0.2–0.7	[27]
Малайзия	Мох	9.5 ± 5.9	[28]
Малайзия	Фрукты	0.03 ± 0.03	[28]
Малайзия	Трава	0.38 ± 0.3	[28]
Нигерия	Пшеница (зерно)	6.0	[29]
Нигерия	Белые бобы	6.0 ± 1.3	[30]
Нигерия	Красные бобы	3.5 ± 1.9	[30]
Нигерия	Рис (немытый)	10.5 ± 2.0	[30]
Нигерия	Рис (мытый)	4.0 ± 1.8	[30]
Нигерия	Корни маниоки	3.5 ± 1.9	[30]
Нигерия	Слоновая трава	33.4 ± 3.9	[31]
Нигерия	Овощи (капуста)	0.073 ± 0.01	[32]
Нигерия	Овощи (огурцы)	0.13 ± 0.03	[32]
Нигерия	Овощи (шпинат)	1.3 ± 0.1	[32]
Нигерия	Белые бобы	(6.2 ± 1.6) × 10 ⁻²	[32]
Нигерия	Зеленые бобы	0.44 ± 0.01	[32]
Нигерия	Рис	(9.6 ± 2.0) × 10 ⁻²	[32]
Нигерия	Маис	(5.8 ± 2.0) × 10 ⁻²	[32]
Нигерия	Таро	0.3 ± 0.08	[32]
Нигерия	Ямс	0.4 ± 0.01	[32]
Нигерия	Картофель	1.1 ± 0.03	[32]
Испания	Трава	1.5 ± 0.8	[20]
Турция	Чебрец	71–92	[33]
США (Саванна Ривер)	Нисса (листья)	25 ± 14	[25]
США (Саванна Ривер)	Амбровое дерево (листья)	22 ± 5	[25]
США (Саванна Ривер)	Сосна (иголки)	0.81 ± 0.41	[25]
США (Саванна Ривер)	Клен (листья)	2.0 ± 0.8	[25]
США (Саванна Ривер)	Водяной дуб (листья)	6.4 ± 0.8	[25]
США	Трава	2.2 ± 2.2	[34]

S.I. Ibrahim и W. Whicker [34] представили данные о концентрации изотопов тория в смешанных пробах природных трав (*Agropyron*, *Loelera*, *Hordeum* и *Oryzopsis*, *Melilotus*, *Kochia*, *Salsola*, *Artemisia*), отобранных в месте добычи урана. Кон-

центрации тория в растительности были измерены в пробах растений, отобранных за пределами промышленной площадки (в фоновых областях), на рекультивированных землях и на участках вблизи бывших хвостохранилищ. Концентрация ²³²Th

в пробах растительности варьировала в диапазоне 1–3 Бк/кг. В работе приводятся довольно высокие значения содержания в пробах растительности и других изотопов тория: ^{228}Th (9.3 ± 1.9 Бк/кг, сухой вес) и ^{230}Th (11.0 ± 1.5 Бк/кг, сухой вес), указывающие на влияние прошлой деятельности по добыче и обогащению урана. Высокие концентрации ^{228}Th и ^{230}Th в растениях наблюдались и в зоне, которая была реабилитирована после вывода предприятия из эксплуатации.

В ряде работ, помимо ^{232}Th , также была представлена информация и для других изотопов тория, которые относятся к цепочкам распада ^{238}U и ^{232}Th . По данным работы [35] концентрация ^{228}Th в пастбищной траве, отобранной в Испании, составляет 8.0 ± 3.0 Бк/кг, в то время для Великобритании и Сербии (район с повышенным выходом урановых пород) содержание ^{230}Th (продукт распада ^{238}U) в растениях составляло 0.13 и 11.2 Бк/кг (сухой вес) [18, 22].

Данные по содержанию тория в растениях антропогенно-нарушенных территорий, как правило, превышают типичные для фоновых областей значения. Так, исключительно высокими являются концентрации ^{232}Th , составляющие 33.4 Бк/кг (сухой вес) в пробах травы, отобранных в районе расположения предприятия по добыче олова в Нигерии [31]. Максимально высокие концентрации тория, составляющие 70–90 Бк/кг (сухая масса), отмечены в пробах тимьяна (*Thymus squarrosus* L.), взятых вблизи предприятия по добыче ториевой руды в Кызылкаорене, Турция [33].

В то же время концентрации ^{232}Th в пробах, отобранных на территориях с повышенным содержанием тория, были меньше, чем это можно было ожидать на основе данных, полученных в регионах с нормальным фоном. Это позволяет сделать вывод о наличии у растений определенных механизмов, влияющих на поглощение тория.

Накопление тория в древесных растениях

Концентрации ^{232}Th в листьях древесных растений, отобранных в районах с фоновыми уровнями тория в почвах, находились в диапазоне от 0.05 до 1.8 Бк/кг (сухой массы) со средним геометрическим 0.7 Бк/кг. Данные по концентрации ^{232}Th в древесине кустарников варьировали в более высоких пределах от 0.5 до 0.7 Бк/кг. Распределение тория по органам является довольно неоднородным. Максимальные уровни содержания тория отмечаются в коре и листьях, что показывает значимость внешнего загрязнения, содержание этого элемента в древесине примерно в 10 раз ниже (табл. 1).

Концентрации ^{232}Th в листьях древесных растений, отобранных в районах с повышенным со-

держанием тория, до двух порядков величины выше, чем на участках с обычным фоном (геометрическое среднее – 5.6 Бк/кг (сухой массы)). Исследования, посвященные оценке эффективности фитоэкстракции ^{232}Th из почв водно-болотных угодий, расположенных в пойме р. Савана [25], показали, что концентрации ^{232}Th в листьях ниссы и амбрового дерева достигают 25 Бк/кг, что свидетельствует о возможности применения этих видов растений для фиторемедиации. Концентрации тория в листьях деревьев с загрязненных водно-болотных угодий были выше, чем в листьях деревьев, отобранных на незагрязненных участках (табл. 2), но существенно не отличались от концентраций тория в древесных растениях других подобных участков [34].

Содержание тория в злаках

Концентрации ^{232}Th в зерне, оцененные на основе всех доступных данных, варьируют от 2.0×10^{-3} до 1.1 Бк/кг со средним геометрическим 1.6×10^{-2} Бк/кг (табл. 1). Наименьшие значения содержания тория в зерне, которые варьируют от 1.0×10^{-3} до 1.1×10^{-2} Бк/кг со средним геометрическим 4.0×10^{-3} Бк/кг злаковых, отмечены для риса. Концентрации ^{232}Th в зерне пшеницы, выращиваемой в Индии, существенно превышают этот диапазон и варьируют диапазоне от 0.5 ± 0.1 до 1.1 ± 0.2 Бк/кг в зависимости от свойств почвы. Более низкие значения концентрации в зерне озимой пшеницы 0.05 ± 0.03 Бк/кг, хотя и превышающие содержание ^{232}Th в рисе, получены при изучении влияния технологий органического земледелия на поступление в растения естественных тяжелых радионуклидов в Бельгии [5]. В то же время и эти достаточно низкие для злаков значения существенно выше значений концентраций тория в рисе (табл. 3).

Концентрации ^{232}Th в зерне злаков, выращиваемых в местах повышенного содержания тория в почвах, варьировали в более высоком диапазоне от 0.096 до 10.5 со средним геометрическим 2.6 Бк/кг (сухая масса). Максимальные концентрации тория в злаках (рисе) (10.5 ± 1.8 Бк/кг (сухая масса)) отмечены в Нигерии. При этом концентрация ^{232}Th в непромытом рисе достигала 10.5 ± 1.8 Бк/кг (сухая масса), тогда как после промывки эта величина снижалась до 4.0 ± 1.8 Бк/кг [30]. Таким образом, для злаковых культур также отмечается влияние поверхностного загрязнения на содержание тория в растениях, что необходимо учитывать при оценке значимости путей, определяющих загрязнение растений.

Отметим, что концентрации ^{232}Th в зерне, измеренные как в областях с фоновыми концентрациями тория в почвах, так и в антропогенно-нарушенных ландшафтах, во многих случаях выше

справочного значения 3.0×10^{-3} , указанного в докладе НКДАР ООН [2].

Накопление тория в овощах

Овощи представляют собой очень разнообразную группу растений и включают клубни и корнеплоды, листовые овощи, бобы и другие, т.е. растения, которые нельзя отнести ни к одной из вышеуказанных групп. Некоторая часть данных об овощах была дана на сырую массу, так как они чаще потребляются в свежем виде.

Клубни и корнеплоды

Концентрации ^{232}Th в этой группе овощей варьировали от 9.0×10^{-4} до 1.9 Бк/кг со средним геометрическим 1.6×10^{-4} Бк/кг (сырой вес). Наибольшие концентрации ^{232}Th отмечены в диком картофеле, выращивание которого в Австралии отличается от технологий производства картофеля в других странах. Концентрации ^{232}Th в корнеплодах были несколько выше, чем у картофеля, и варьировали в интервале $0.4\text{--}4.0 \times 10^{-2}$ Бк/кг со средним геометрическим 1.2×10^{-3} Бк/кг.

Концентрации ^{232}Th в различных видах клубнеплодов в районах с повышенным содержанием тория в почвах (от 374 до 2200 Бк/кг сухой массы) были получены в районе расположения месторождений олова в Нигерии. Содержание тория в картофеле в этом регионе на три порядка выше, чем соответствующие значения для фоновых областей. Высокие концентрации тория в клубнях могут быть объяснены как разнообразием различных видов клубнеплодов, культивируемых в Нигерии, так и высокими концентрациями тория на участках, используемых для выращивания растений.

Другие овощи

Концентрации ^{232}Th в овощах в регионах обычного ториевого фона составляют от 5.0×10^{-5} до 8.4×10^{-2} Бк/кг при геометрическом среднем значении, равном 2.4×10^{-3} Бк/кг (сырая масса). В регионах с повышенным ториевым фоном (район добычи тория в Нигерии) эта величина равна 3.7×10^{-2} Бк/кг, что существенно выше среднего значения, рассчитанного для фоновых территорий.

Как листовые, так и нелистовые овощи включают много видов, таких как капуста, огурцы, кабачки и помидоры, которые отличаются по содержанию сухого вещества и в различной степени подвержены загрязнению частицами тория, находящимися в атмосфере. Среднее геометрическое концентраций ^{232}Th в листовых овощах со-

Таблица 3. Справочные значения для концентраций изотопов тория в некоторых растительных продуктах, принятых в докладе НКДАР ООН [2]

Table 3. Reference Values for thorium isotope concentrations in the plant products as adopted in the UNSCEAR Report [2]

Группа продуктов	Активность (мБк/кг, сырой вес)		
	^{228}Th	^{230}Th	^{232}Th
Зерно	3	10	3
Листовые овощи	15	20	15
Корнеплоды и фрукты	0.5	0.5	0.5

ставило 7.6×10^{-3} Бк/кг. В нелистовых овощах эта величина оказалась равной 1.5×10^{-3} Бк/кг, отражая особенности путей загрязнения торием этих видов растений.

Концентрации тория в листовых овощах в регионах с естественным ториевым фоном примерно в 2 раза ниже справочного значения 1.5×10^{-2} Бк/кг для этой группы овощей, указанного в докладе НКДАР ООН [2], а средняя концентрация для нелистовых превышает справочное значение 0.5×10^{-3} Бк/кг (сырой вес), приведенное в публикации НКДАР [2]. Таким образом, справочные значения НКДАР занимают промежуточное значение между оценками, сделанными в настоящей работе для территорий с фоновыми и повышенными уровнями тория.

Содержание тория в фруктах

Концентрации изотопов тория в фруктах относительно низки и варьируют в регионах с естественным ториевым фоном от 1.0×10^{-5} до 4.0×10^{-3} Бк/кг (сырая масса) с геометрическим средним 8.5×10^{-4} Бк/кг. Более высокие значения, составляющие $0.01\text{--}0.02$ Бк/кг (сырая масса), отмечены в районе добычи редких металлов в Малайзии [28] и в зоне добычи урана в Австралии [4]. Среднее геометрическое концентраций в фруктах – 2.9×10^{-2} Бк/кг, оцененное для зоны с высоким содержанием тория в окружающей среде, примерно более чем в 10 раз превышает справочное значение 5.0×10^{-4} Бк/кг, приведенное в докладе НКДАР ООН (2000) [2], тогда как содержание тория в фруктах, измеренное на территориях нормального фона, довольно близко к этой величине.

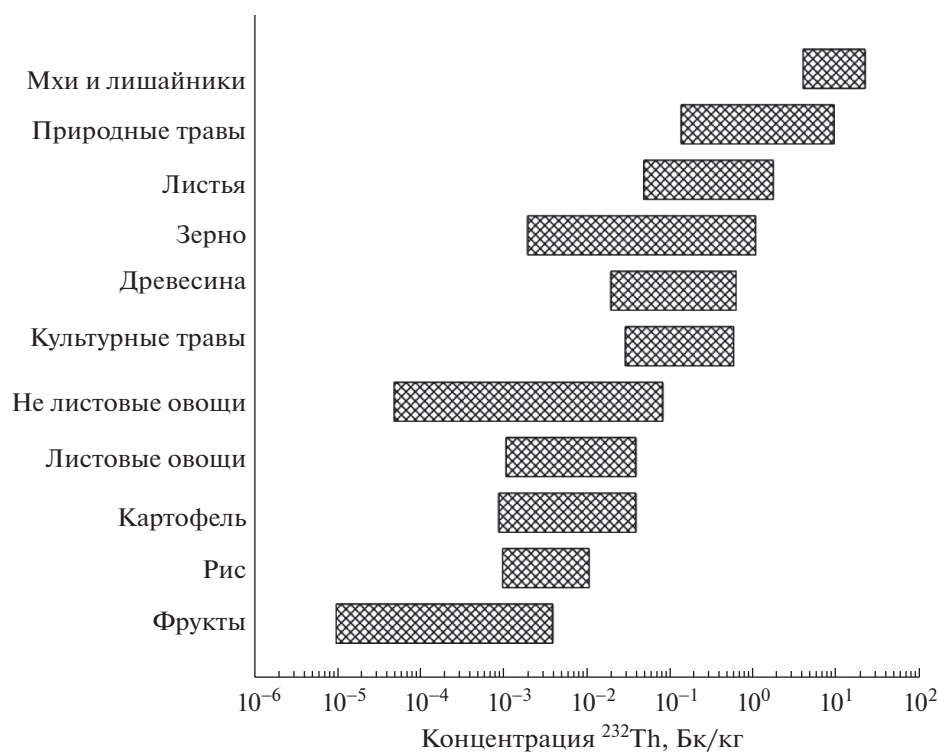


Рис. 1. Концентрации ^{232}Th в различных группах растений.
Fig. 1. Concentrations of ^{232}Th in different groups of plants.

Сравнительный анализ содержания тория в растениях

Данные по содержанию тория в каждой из рассматриваемых групп растений варьируют до двух порядков величины (рис. 1). Средние геометрические значения концентрации ^{232}Th в растениях, рассчитанные на сухой вес, можно представить в виде ряда: < фрукты < рис < листовые овощи и картофель < нелистовые овощи < культурные травы и древесина < зерно злаковых растений (отличных от риса) и листья древесных растений < < природные травы < мхи и лишайники. Таким образом, самые высокие концентрации ^{232}Th наблюдаются во мхах и лишайниках, а самые низкие – в фруктах. Следует также отметить, что для категорий фруктов и нелистовых овощей отмечена очень высокая вариабельность данных, что связано как с разнообразием морфологии плодов растений, относящихся к этим категориям, так и различным вкладом путей загрязнения, определяющих концентрацию тория в этих объектах.

Изотопные различия

Источники информации, которые предоставляют данные для трех наиболее важных изотопов тория, ограничены. Обычно предполагается, что

^{232}Th и ^{228}Th находятся в равновесии (цепочка распада ^{232}Th), в то время как концентрации активности ^{230}Th (цепочка распада ^{238}U) в природных объектах могут варьировать в зависимости от содержания в почвах урана и антропогенной активности, обуславливающей дополнительное поступление ^{238}U в окружающую среду. В среднем концентрация ^{230}Th в злаках в 3 раза выше, чем в ^{232}Th , в 1.3 раза выше в листовых овощах и близка в корнеплодах и фруктах [2].

Данные о концентрациях ^{228}Th , ^{230}Th и ^{232}Th в 22 видах растений, включая два вида злаковых, шесть видов плодовых и 14 видов овощей, показывают, что отношения ^{228}Th к ^{232}Th и ^{230}Th к ^{232}Th в этих видах растений варьируют от 1.4 до 21.8 и от 0.7 до 1.9, в то время как средние значения этих отношений составляют 6.0 ± 5.4 и 1.3 ± 0.4 соответственно [15, 39]. Видно, что во всех этих случаях концентрация активности ^{228}Th значительно превышала концентрацию ^{232}Th , а концентрация ^{230}Th имела тенденцию быть выше. Это позволяет сделать вывод, что в природе наблюдается значительное отклонение содержания ^{228}Th от равновесия, связанное с возможным обогащением природных объектов ^{228}Ra .

Более высокие концентрации активности ^{228}Th и ^{230}Th по сравнению с концентрациями ^{232}Th были также отмечены S.I. Ibrahim, W. Whicker [34] для района добычи и переработки урана в штате Вайоминг (США). Отношения концентраций активности $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ и $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ варьировали от 4.9 до 8.6 и от 3.9 до 3.86×10^2 . Более низкие значения этих отношений отмечались для реабилитированных земель, а высокие — для растений, отобранных возле хвостохранилища. Отмечено, что более высокие концентрации активности ^{228}Th могут быть связаны с обогащением растений ^{228}Ra и (или) ^{228}Ac в растениях, в дополнение к прямому поступлению из почвы ^{228}Th [34]. Это предположение было подтверждено данными работ [15, 39], в которых показана прямая связь концентраций ^{228}Ra и ^{228}Th в продуктах питания растительного происхождения, потребляемых в Центральной Польше [15].

Концентрации ^{230}Th в растениях обычно находятся в диапазоне 10^{-2} – 10^{-3} Бк/кг (сухой вес). Существенно более высокие концентрации этого изотопа — 1.8 ± 1.1 и 7.2 ± 5.2 Бк/кг отмечены в *Spartina densiflora* (природной растительности, типичной для болотных районов в Европе), отобранной вблизи завода по производству фосфатов в Испании. Соотношения концентраций ^{228}Th и ^{230}Th к ^{232}Th составляли 5.4 ± 1.4 и 1.4 ± 0.3 Бк/кг соответственно и были аналогичны тем, которые были измерены для почвы [3]. Эти данные хорошо согласуются с измерениями содержания тория, выполненными в центральной Польше [15, 39] и позволяют сделать вывод о том, что цепочка распада ^{238}U является важным источником тория в растениях, что указывает на необходимость совместного рассмотрения продуктов распада ^{238}U и ^{232}Th в природных средах.

Распределение тория по органам и тканям растений

Хотя данные о распределении тория в различных тканях растений ограничены, они позволяют сделать некоторые выводы, важные для понимания переноса тория в растениях. L. Oufni [13] исследовал накопление и транслокацию тория у 16 видов лекарственных трав, отобранных в местах с фоновым содержанием тория. Наибольшие концентрации ^{232}Th наблюдались в корнях растений, за которыми следовали листья, стебель, семена и плоды. Отношения концентраций тория в листьях, стеблях и плодах к содержанию тория в корнях варьировали в узких пределах: 0.76–0.79, 0.63–66 и 0.45–0.46 соответственно. Важным моментом является то, что хотя разница в накоплении тория в разных частях растений была статистически значимой, она была ниже, чем можно

было ожидать. Отношения концентраций тория в плодах и семенах к концентрациям в листьях составляли 0.58–0.60.

В то же время имеются данные и о гораздо более значительных различиях между накоплением тория в корнях и стеблях трав, отобранных в местах с высоким содержанием тория в почве. Отношения концентрации тория в стеблях к содержанию тория в корнях находились в диапазоне 0.07–0.2 со средним значением 0.11 ± 0.04 [28]. Аналогичные данные для некоторых тропических растений и риса приводятся в работе [21]. Показано, что содержание ^{232}Th в шелухе в 1.7 раза выше, чем в рисе, тогда как отношение концентраций тория в стебле и листьях к концентрации тория в корнях кангала (многолетней травы, культивируемой в южной части Китая, Таиланда и Индонезии) составляет 0.05 и 0.13 соответственно.

Более высокие различия между содержанием тория в листьях, плодах и корнях субтропических деревьев отмечены для района бывшего места добычи урана в Испании: отношения концентраций ^{230}Th в плодах и в листьях соответствующим значениям в корнях были на уровне 0.07–0.08 [36].

Данные о распределении тория в различных тканях пшеницы, отобранной на Индо-Гангской равнине, Пенджаб (Индия), представлены на рис. 2. Видно, что отношения содержания тория в тканях растений к содержанию этого элемента в корнях можно представить в виде ряда: корень > > шелуха > стебель > зерно соответственно (рис. 1).

У древесных растений торий также распределяется неоднородно, показывая способность к более высокому накоплению в более старой биомассе [1]. Высокие концентрации тория наблюдались в корнях, за которыми следуют листья (или иголки) и ветви, и, наконец, заболонь и древесина (табл. 4).

Общий вывод, относящийся к этим результатам, заключается в том, что во всех пробах растений, взятых в районах с различными концентрациями тория в почве, максимально высокие концентрации у растений наблюдались в корнях, в то время как концентрации радионуклидов в наземных тканях остаются довольно низкими. Таким образом, можно сделать заключение, что корни играют роль биологического барьера для проникновения тория в растения.

Зависимость концентрации тория в растениях от концентрации тория в почве

Хотя при оценке поступления тория из почвы в растения обычно используется концепция линейности, т.е. предполагается, что концентрация тория в растительности прямо пропорциональна концентрации этого элемента в почве, существует достаточно много данных, противоречащих

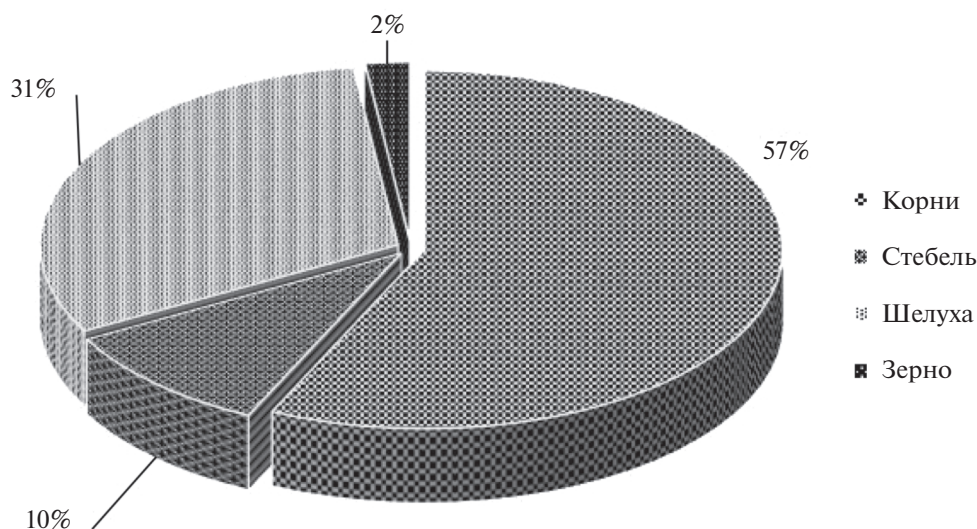


Рис. 2. Распределение тория по тканям пшеницы (по данным работы [12]).

Fig. 2. Distribution of thorium among wheat tissues (according to [12]).

этой концепции. В работе [40] представлены данные о концентрациях ^{232}Th в девяти кормовых видах трав для одинаковых по агрохимическим характеристикам почв с двумя уровнями загрязнения 312 и 605 Бк/кг (сухой вес), т.е. для участков, которые различались в уровнях загрязнения торием примерно в 2 раза. Отношения концентраций ^{232}Th в растениях к содержанию ^{232}Th в почве ($K_{\text{п}}$) на участках с более высоким загрязнением почвы были ниже, чем в растениях на участках с более низкими концентрациями тория. Подобные закономерности накопления тория растениями также описаны в работах [1, 28, 31].

Это может объясняться как эффектом фитотоксичности, так и присутствием определенных

механизмов, ограничивающих поступление тория в растительность. Как следствие, использование концепции линейности коэффициентов перехода во всем наблюдаемом диапазоне концентраций этого элемента в окружающей среде неприменимо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрации ^{232}Th в растениях изменяются в широких пределах от 0.5×10^{-4} до 22 Бк/кг для почв с нормальным фоном и от 0.058 до 80 Бк/кг для районов с высокими концентрациями тория в почве. Накопление тория в растениях зависит от особенностей растительности. Более высокие концентрации активности ^{232}Th наблюдаются во

Таблица 4. Средние концентрации ^{232}Th в растениях тайги (сухая масса) [10]

Table 4. Mean concentrations of ^{232}Th in taiga plants (dry mass) [10]

Вид растений	Концентрация ^{232}Th , Бк/кг (сухой вес)				Число образцов
	кора	древесина	ветки	листья	
Береза пушистая	0.18	0.12	0.22	1.45	12
Ель сибирская	1.48	0.13	0.39	1.05	14
Сибирская Лиственница	2.20			1.58	3
Рябина	2.81	0.22		0.95	8
Осина	2.84	0.18	0.75	0.56	3
Черная ива	2.91	0.27	0.59	2.98	3
Ива двухцветная	4.14			3.85	3
Черника		0.72		4.20	8
Багульник		0.63		5.95	4
Вороника		0.24		0.70	3

мхах и лишайниках, а более низкие – во фруктах и овощах. Корневое поглощение изотопов тория растениями невелико, поэтому в регионах с умеренным и сухим климатом преобладающий вклад в загрязнение растений торием могут вносить частицы пыли, содержащие торий. Особенно значим этот путь загрязнения в антропогенно-нарушенных ландшафтах, в которых содержание тория в нижних слоях атмосферы может быть существенным. Следует также отметить, что в природе наблюдается значительное отклонение содержания ^{228}Th (входящего в цепочку распада ^{232}Th) от равновесия, связанное с возможным обогащением природных объектов ^{228}Ra , а высокие значения отношения ^{230}Th к ^{232}Th – присутствием в почвах повышенных концентраций ^{238}U . В ряде исследований показано, что зависимость поступления тория в растения от его содержания в почве отклоняется от линейной зависимости. Это ограничивает использование коэффициентов перехода для прогнозирования поступления этого радионуклида в растения и определяет необходимость продолжения исследований механизмов его накопления в растительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.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 Russ.)]
2. 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: UNSCEAR, 2000. 84–156.
3. *Фесенко С.В., Емлютина Е.С.* Концентрация тория в природных средах: обзор мировых данных // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60. № 5. С. 542–555. [*Fesenko S.V., Emlutina E.S.* Thorium concentrations in the environment: a review of the world data // *Radiacionnaya biologiya. Radiojehologiya*. 2020. V. 60. № 5. P. 542–555. (In Russ.)]
4. *Ryan B., Martin P., Iles M.* Uranium-series radionuclides in native fruits and vegetables of northern Australia // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2005. V. 264. № 2. P. 407–412.
5. *Lindahl P., et al.* Natural radioactivity in winter wheat from organic and conventional agricultural systems // *J. Environ. Radioact.* 2011. V. 102. P. 163–169.
6. *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.
7. *Santos E.E., Lauria D.C., Amaral E.C.S., Rochedo E.R.* Daily ingestion of ^{232}Th , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{210}Pb in vegetables by inhabitants of Rio de Janeiro City // *J. Environ. Radioact.* 2002. V. 62. P. 75–86.
8. *Apps M.J., Duke M.J.M., Stephens-Newsham L.G.* A study of radionuclides in vegetation on abandoned uranium tailings // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1988. V. 123. P. 133–147.
9. *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.
10. *Верховская И.Н., Вавилов П.П., Маслов В.И.* Миграция естественных радиоактивных элементов в окружающей среде и распределение их между биотическими и абиотическими компонентами земной среды // *Изв. АН СССР. Сер. Биология*. 1967. Т. 2. С. 270–285. [*Verhovskaja I.N., Vavilov P.P., Maslov V.I.* Migracija estestvennyh radioaktivnyh jelementov v okruzhajushhej srede i raspredelenie ih mezhdu biotichesкими i abiotichesкими компонентами земной среды // *Izvestija AN SSSR. Seriya Biologiya*. 1967. V. 2. P. 270–285. (In Russ.)]
11. *Jha S.K., Gothankar S., Longwai P.S. et al.* 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.
12. *Pulhani V.A., Dafauti S., Hegde A.G. et al.* Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil // *J. Environ. Radioact.* 2005. V. 79. P. 331–346.
13. *Oufni L., Taj S., Manaut B., Eddouks M.* Transfer of uranium and thorium from soil to different parts of medicinal plants using SSNTD // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2011. V. 287. P. 403–410.
14. *Popic J.M., Salbu B., Strand T., Skipperud L.* Assessment of radionuclide and metal contamination in a thorium rich area in Norway // *J. Environ. Monit.* 2011. V. 13. P. 1730–1738.
15. *Pietrzak-Flis Z., Rosiak L., Suplinska M.M. et al.* Dietary intake of ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{232}Th and ^{226}Ra in the adult population of central Poland // *Sci. Tot. Environ.* 2001. V. 273. P. 163–169.
16. *Milošević Z., Kljajic R., Bauman A., Kljajic R.* Radiochemical studies of U, Ra-226 and Th in lichens, moss, and wildlife in central Yugoslavia // Second special symposium on natural radiation in the environment (Conference proceedings) Bombay, Bhabha Atomic Research Centre, 1981. Bombay, 1982. P. 36–37.
17. *Dragovic S., Mihailovic N., Gajic B.* Quantification of transfer of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K and ^{137}Cs in mosses of a semi-natural ecosystem // *J. Environ. Radioact.* 2010. V. 101. P. 159–164.
18. *Ćujić M., Dragović S.* Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying ERICA tool and RESRAD BIOTA code // *J. Environ. Radioact.* 2017. V. 188. P. 108–114.
19. *Štok M., Smodiš B.* Natural radionuclides in milk from the vicinity of a former uranium mine // *Nucl. Engineer. Des.* 2011. V. 241. P. 1277–1281.
20. *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.
21. *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 // *Radioanal. Nucl. Chem.* 2015. V. 303. P. 2571–2577.
22. *Beresford N.A., Barnett C.L., Jones D.G. et al.* Background exposure rates of terrestrial wildlife in England and Wales // *J. Environ. Radioact.* 2008. V. 99. P. 1430–1439.
 23. *Laul C.J., Weimerr W.C., Rancitelli L.A.* Biogeochemical distribution of rare earth and other trace elements in plants and soils // *Origin and Distribution of the Elements*. 11 / Ed. L.H. Ahrens. Oxford: Pergamon Press, 1979. 390 p.
 24. *Ibrahim S.A., Wrenn M.E., Singh N.P. et al.* Thorium concentrations in human tissues from two US populations // *Health Physics*. 1983. V. 44. P. 213–220.
 25. *Hinton T.G., Knox A.S., Kaplan D.I., Sharitz R.* Phytoextraction of uranium and thorium by native trees in a contaminated wetland // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2005. V. 264. № 2. P. 417–422.
 26. *Linsalata P., et al.* An assessment of soil-to-plant concentration ratios for some natural analogues of the transuranic elements // *Health Phys.* 1989. V. 56. P. 33–46.
 27. *Lenka P., et al.* Ingestion dose from ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K and ^{137}Cs in cereals, pulses and drinking water to adult population in a high background radiation area, Odisha, India // *Radiat. Prot. Dosim.* 2012. V. 153. P. 328–333.
 28. *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.
 29. *Olomo J.B.* The natural radioactivity in some Nigerian foodstuffs // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1990. V. 299. P. 666–669.
 30. *Arogunjo A.M., Ofuga E.E., Afolabi M.A.* Levels of natural radionuclides in some Nigerian cereals and tubers // *J. Environ. Radioact.* 2005. V. 82. P. 1–6.
 31. *Jibiri N.N., Ajao A.O.* Natural activities of ^{40}K , ^{238}U and ^{232}Th in elephant grass (*Pennisetum purpureum*) in Ibadan metropolis, Nigeria // *J. Environ. Radioact.* 2005. V. 78. P. 105–111.
 32. *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.
 33. *Zararsiz A., Kirmaz R., Arikan P.* Field study on thorium uptake by plants within and around of a thorium ore deposit // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1997. V. 222. P. 257.
 34. *Ibrahim S.I., Whicker W.* Comparative uptake of U and Th by native plants at a U production site // *Health Physics*. 1987. V. 54. № 4. P. 413–419.
 35. *Baeza A., Paniagua J., Rufo M. et al.* Seasonal variations in radionuclide transfer a Mediterranean grazing-land ecosystem // *J. Environ. Radioact.* 2001. V. 55. P. 283–302.
 36. *Blanco Rodriguez M.P., Vera Tome F., Lozano J.C., Perez Fernandez M.A.* Transfer of ^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , and ^{210}Pb from soils to tree and shrub species in a Mediterranean area // *Appl. Radiat. Isot.* 2010. V. 68. P. 1154–1159.
 37. *Markert B.* Instrumental multi-element analysis of plants (VCH-Verlagsgesellschaft mbH. Weheim, 1991. P. 25–48.
 38. International Atomic Energy Agency. Quantification of radionuclide transfers in terrestrial and freshwater environments for radiological assessments. TECDOC 1616. Vienna: IAEA, 2009. 640 p.
 39. *Pietrzak-Flis Z., Suplinska M.M., Rosiak L.* The dietary intake of ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{232}Th , ^{228}Th and ^{226}Ra from food and drinking water by inhabitants of the Waibrzych region // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 1997. V. 222. P. 189–193.
 40. *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.
 41. ICRP. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP. 38. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd. 2008. 242 p.
 42. *Martin P., Hancock G.J., Johnston A., Murray A.S.* Natural-series radionuclides in traditional north Australian Aboriginal foods // *J. Environ. Radioact.* 1998. V. 40. P. 37–58.
 43. *Таскаев А.И., Титаева Н.А., Алексахин Р.М., Поликарпов Г.Г.* Распределение и миграция естественных радионуклидов в природных биогеносах // Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Наука, 1990. С. 15–73. [*Taskaev A.I., Titaeva N.A., Alexakhin R.M., Polikarpov G.G.* Raspređenje i migracija estestvennyh radionuklidov v prirodnyh biogeocenozah // Tjzhelye estestvennye radionuklidy v biosphere / Ed. R.M. Alexakhin. Moskva: Nauka, 1990. P. 15–73. (In Russ.)]

Thorium Concentration in Plants: A Review of World Data

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

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

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

A review of available data on thorium concentrations in plants and related foodstuffs is presented. It is shown that the concentration of ^{232}Th in plants in regions with normal background radiation varies from 0.5×10^{-4} to 22 Bq/kg, while in regions with elevated environmental thorium concentrations it reaches 0.058–80.0 Bq/kg. It was also shown that the distribution of thorium among plant tissues is heterogeneous. The role of root systems as a biological barrier for thorium penetration into plants is noted.

Keywords: thorium, uranium, plants, data review, concentration ration