

УДК 539.163:59.009:59.085:574.2

## СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В НАЗЕМНЫХ И ПРЕСНОВОДНЫХ ОРГАНИЗМАХ: ОБЗОР МИРОВЫХ ДАННЫХ

© 2023 г. С. В. Фесенко<sup>1,\*</sup>, Е. С. Емлютина<sup>1</sup><sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

\*e-mail: Corwin\_17F@mail.ru

Поступила в редакцию 29.09.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 09.11.2022 г.

Представлен обзор данных о концентрациях тория в тканях наземных и пресноводных организмов. Показано, что концентрация  $^{232}\text{Th}$  в тканях животных изменяется в широких пределах, отражая концентрации тория в окружающей среде. Концентрации тория в тканях сельскохозяйственных животных варьируют от  $0.9 \times 10^{-4}$  до  $2.1 \times 10^{-2}$  Бк/кг для регионов с нормальным ториевым фоном и от  $3.1 \times 10^{-2}$  до  $1.4 \times 10^{-1}$  Бк/кг (сырая масса) в районах с повышенными концентрациями тория в почве. Более высокие значения отмечаются в тканях диких животных. Наибольшие значения концентрации  $^{232}\text{Th}$  отмечены в скелете, за которым следовали легкие, почки, печень и, наконец, мышцы. Отмечена тенденция к большему накоплению тория в видах, занимающих более высокое положение в трофических цепях. Показано, что в условиях обычного фона концентрация  $^{232}\text{Th}$  в рыбе может достигать  $1.0 \times 10^{-1}$  Бк/кг (сырая масса), а в районах высокого ториевого фона эта величина может быть до 100 раз выше. Полученные результаты показывают важность изучения переноса тория по пищевым цепочкам и необходимость учета изученных закономерностей при оценке последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды.

**Ключевые слова:** торий, уран, обзор, животные, продукты животноводства, пресноводные рыбы

**DOI:** 10.31857/S0869803123010071, **EDN:** JXETZL

Концентрации изотопов тория в тканях животных варьируют в широких пределах из-за различий в фоновых уровнях содержания этих радионуклидов в почвах, природных условиях и особенностях ведения сельского хозяйства [1–3]. Основными источниками поступления радионуклидов в организм животного являются корма, вода, а также частицы почвы. Поступив в желудочно-кишечный тракт животного (ЖКТ), часть радионуклидов всасывается в кровь, а оставшаяся доля радионуклидов выводится из организма с фекальными массами [1]. Таким образом, абсорбция радионуклидов в ЖКТ является первым этапом при поступлении радионуклидов в организм животных, а величина коэффициента всасывания определяет накопление радионуклидов в органах и тканях. Вследствие малой подвижности тория в окружающей среде обычно считается, что его всасывание в ЖКТ является достаточно низким. МКРЗ, обобщая доступные данные, относит торий к группе радионуклидов, таких как Pu, Ce, Np, Am и Cm, характеризующихся наименьшим всасыванием тория в желудке человека [2].

Вследствие этого накопление тория в органах и тканях животных в обычных условиях невели-

ко, а данные о накоплении этого радионуклида животными очень ограничены. Довольно редки и работы, посвященные накоплению тория в пресноводных экосистемах: рыбах, амфибиях, земноводных. В то же время во многих сценариях загрязнения окружающей среды торий играет важную роль в облучении населения и природных организмов [3], что и определяет необходимость обобщения данных о концентрациях тория в тканях наземных и водных организмов, а также в соответствующих продуктах. Важным является и обобщение информации о содержании тория в некоторых субпродуктах, таких как печень и почки животных, которые также являются компонентами рациона человека [3]. Учитывая, что эти субпродукты во многих случаях вносят значимый вклад в облучение населения, анализ этих данных необходим для корректной оценки риска радиоактивного загрязнения окружающей среды для человека и биоты.

Также как и в наших предыдущих публикациях [4, 5], концентрации тория в сельскохозяйственных животных и природных организмах представлены как для областей с фоновым содержанием тория в окружающей среде, так и для областей с концентрациями тория в окружающей

среде, существенно превышающими фоновые уровни, которые определяются как антропогенной деятельностью: добычей урана, угля, алюминия или редких металлов, так и высоким естественным ториевым фоном [6].

Для территорий с нормальным содержанием тория в окружающей среде значительная часть данных была получена в результате измерений его содержания в продуктах животноводства, используемых человеком.

Представленная статья, основной целью которой было обобщение данных о содержании тория в тканях животных и природных организмов, является логическим развитием публикаций, содержащих обзор мировых данных о содержании изотопов тория в почве, атмосфере, поверхностных водах и растениях [4, 5].

### СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В ТКАНЯХ ДОМАШНИХ ЖИВОТНЫХ

Существующие данные по концентрациям тория в органах и тканях домашних животных получены в основном для территорий с фоновым содержанием тория в почвах. Концентрации активности  $^{232}\text{Th}$  в мясе (мышцах) животных варьировали от  $(4.4 \pm 1.0) \times 10^{-4}$  в свинине [7] до  $(2.4 \pm \pm 0.2) \times 10^{-3}$  Бк/кг в говядине [9] (табл. 1). В то же время достоверных статистических различий между содержанием  $^{232}\text{Th}$  в мышцах рогатого скота (КРС), свинины и кур не выявлено. Также не были выявлены статистически достоверные различия между концентрациями изотопов тория в яйце и мышцах кур [9, 10].

Из данных, представленных в табл. 1, видно, что концентрация  $^{232}\text{Th}$  в молоке КРС примерно в 4 раза меньше, чем в говядине, что практически совпадает с аналогичным отношением для изотопов цезия. Близкими к этой величине являются и отношения концентраций в молоке и мышцах и для других изотопов тория —  $^{228}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$ . Необходимо отметить, что эти соотношения справедливы только для регионов с фоновыми уровнями содержания тория в почвах, в которых концентрации тория в почвах достаточно близки. Для регионов с повышенным содержанием тория в окружающей среде отношения содержания этого радионуклида в молоке к его концентрации в мясе КРС могут существенно варьировать в зависимости от концентраций тория в почвах районов, в которых были отобраны пробы продукции.

Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в костной ткани животных варьируют в достаточно узком диапазоне  $(2.0\text{--}20.0) \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса), значительно превышая концентрации этого радионуклида в мышцах (табл. 1).

Более высокие концентрации  $^{232}\text{Th}$  отмечены в тканях животных регионов с повышенным содержанием тория в окружающей среде. Чрезвычайно высокие концентрации тория  $(2.6 \pm 1.2) \times 10^{-1}$  Бк/л в молоке были отмечены в Индии в районе с повышенным содержанием естественных тяжелых радионуклидов в почве [12]. Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в почве этого региона варьируют от 290 до 480 Бк/кг (сухая масса) со средним значением 430 Бк/кг [12], что более чем в 10 раз выше среднемирового значения для территорий с фоновым содержанием тория в почвах  $(2\text{--}30 \text{ Бк кг}^{-1}$ , сухой массы) [6]. Значительные уровни содержания  $^{232}\text{Th}$  в молоке  $(2.8 \times 10^{-2}$  Бк/л) отмечены и в регионе плато Покос де Калдас в Бразилии [11]. Для территории Польши с содержанием тория в почве близком к фоновому концентрации  $^{232}\text{Th}$  в молоке  $(6.0\text{--}28.1) \times 10^{-4}$  Бк/л были более чем на порядок величины ниже.

По данным НКДАР концентрация  $^{232}\text{Th}$  в молоке, производимом в различных странах, варьирует от  $2.7 \times 10^{-4}$  до  $1.2 \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса), при этом в качестве референтного значения для радиологических оценок предложено использовать  $3.0 \times 10^{-4}$  Бк/кг (сырая масса) [6]. Данные, представленные в табл. 1 для концентраций  $^{232}\text{Th}$  в молоке в регионах с естественным ториевым фоном  $(6.0\text{--}12.0) \times 10^{-4}$ , существенно превышают референтное значение, хотя и находятся в диапазоне значений, приведенных в отчете НКДАР. В то же время средние данные по содержанию  $^{232}\text{Th}$  в мышцах животных, оцененные на основе данных табл. 1 для территорий с нормальным естественным радиационным фоном, довольно близки к референтному значению для мяса 1 мБк/кг, представленном в отчете НКДАР.

Справочные значения изотопов тория  $^{228}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$  в молоке и мясных продуктах, также представленные в публикации НКДАР [6], составляют  $0.3 \times 10^{-3}$  и  $0.5 \times 10^{-3}$  Бк/кг в молоке и  $1.0 \times 10^{-3}$  и  $2.0 \times 10^{-3}$  Бк/кг в мясе, а отношение концентраций  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  примерно равно двум [6]. Отношения концентраций  $^{228}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$  в молоке к концентрации  $^{232}\text{Th}$ , рассчитанные на основе данных табл. 1, варьировали от 1.4 до 117.8 для  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  и от 0.2 до 7.5 для  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ . В случае же, если чрезвычайно высокое значение  $^{228}\text{Th}$  в кости крупного рогатого скота 0.53 Бк/кг, представленное в работе [7], исключить из этой оценки, то диапазон отношений концентраций  $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  составит 1.4–13.3. Отметим, что довольно высокие значения отношения концентраций  $^{228}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  были ранее получены нами для растений [5], что указывает на то, что более высокие концентрации активности  $^{228}\text{Th}$  у животных могут наблюдаться не только из-за прямого поступления

**Таблица 1.** Концентрации тория в тканях домашних животных (Бк/кг, сырая масса)  
**Table 1.** Thorium concentrations in tissues of domestic animals (Bq/kg, fresh mass)

Вид животных	Ткани	Страна	$^{228}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}$	$^{232}\text{Th}$	Ссылки
Территории с фоновым содержанием тория в окружающей среде						
КРС	Кости	Германия	$(5.3 \pm 1.2) \times 10^{-1}$	$(9.7 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	$(4.5 \pm 2.2) \times 10^{-3}$	[7]
КРС	Кости	США	—	$(9.0-160.0) \times 10^{-3}$	$(2.0-23.6) \times 10^{-3}$	[8]
КРС	Почки	США	—	$(4.2-1.5) \times 10^{-2}$	$(2.5-3.6) \times 10^{-3}$	[8]
КРС	Печень	США	—	$(2.2-2.4) \times 10^{-3}$	$(3.4-22) \times 10^{-4}$	[8]
КРС	Легкие	США	—	$(0.3-2.2) \times 10^{-2}$	$(5.9-88.1) \times 10^{-4}$	[8]
КРС	Молоко	Польша	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(0.8 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(0.6 \pm 0.05) \times 10^{-3}$	[9]
	Молоко	Польша	$(2.6 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	$(1.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	[10]
КРС	Мышцы	Польша	$(6.3 \pm 1.5) \times 10^{-3}$	$(2.9 \pm 0.25) \times 10^{-3}$	$(2.4 \pm 0.2) \times 10^{-3}$	[9]
КРС	Мышцы	Германия	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	$(6.0 \pm 1.0) \times 10^{-4}$	$(0.9 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	[7]
КРС	Мышцы	Польша	$(4.9 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	$(3.0 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(3.6 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	[10]
КРС	Мышцы	США	—	$(1.3 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	$(5.6-6.7) \times 10^{-4}$	[8]
Куры	Яйца	Польша	$(2.0 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	$(1.5 \pm 0.15) \times 10^{-3}$	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	[9]
Куры	Яйца	Польша	$(2.3 \pm 0.3) \times 10^{-2}$	$(1.6 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	[10]
Куры	Мышцы	Польша	$(3.8 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(2.0 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	[9]
Куры	Мышцы	Польша	$(2.5 \pm 0.8) \times 10^{-3}$	$(2.1 \pm 0.68) \times 10^{-3}$	$(1.7 \pm 0.6) \times 10^{-3}$	[10]
Свиньи	Кости	Германия	$(5.0 \pm 0.4) \times 10^{-2}$	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$	—	[7]
Свиньи	Мышцы	Германия	$(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	$(8.0 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	$(4.4 \pm 1.0) \times 10^{-4}$	[7]
Свиньи	Мышцы	Польша	$(5.7 \pm 0.7) \times 10^{-3}$	$(2.7 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	$(1.8 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	[9]
Свиньи	Мышцы	Польша	$(2.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}$	$(7.3 \pm 3.0) \times 10^{-4}$	$(5.2 \pm 2.0) \times 10^{-4}$	[10]
Территории с повышенным содержанием тория в окружающей среде						
КРС	Молоко	Бразилия		$1.5 \times 10^{-2}$	$2.8 \times 10^{-2}$	[11]
КРС	Молоко	Индия			$(2.6 \pm 1.2) \times 10^{-1}$	[12]
КРС	Мышцы	Бразилия		$5.6 \times 10^{-2}$	$1.1 \times 10^{-1}$	[11]
КРС	Мышцы	Индия			$(1.2 \pm 0.4) \times 10^{-1}$	[12]
КРС	Мышцы	Индия			$1.4 \times 10^{-1}$	[13]
Куры	Яйца	Бразилия		$1.5 \times 10^{-1}$	$2.8 \times 10^{-1}$	[11]
Куры	Мышцы	Бразилия		$1.6 \times 10^{-2}$	$3.1 \times 10^{-2}$	[11]

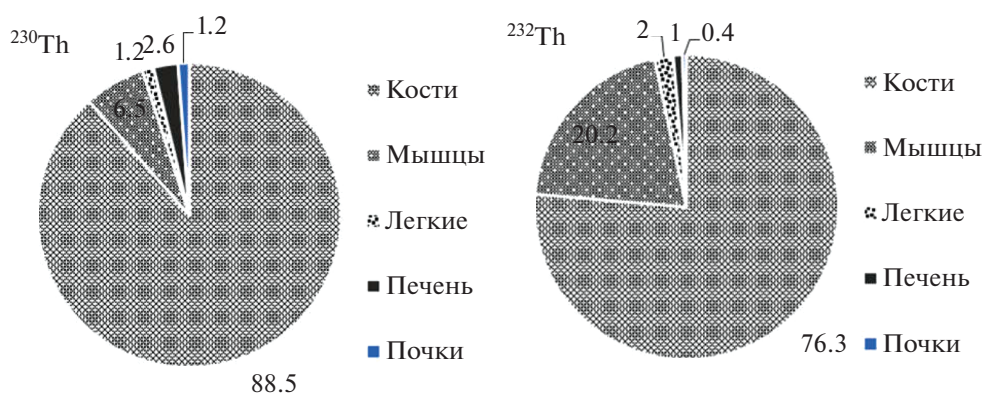
$^{228}\text{Th}$  в продукцию, но и накопления в продукции  $^{228}\text{Ac}$  и его последующего распада с переходом по цепочке в  $^{228}\text{Th}$  во время ее хранения.

Это позволяет сделать вывод об отсутствии равновесия между изотопами тория в тканях животных и продукции животноводства и показывает необходимость прямых измерений всех изотопов этого радионуклида при оценке риска загрязнения окружающей среды тяжелыми естественными радионуклидами.

Вариабельность между концентрациями  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  в тканях животных является ожидаемой и определяется как различием между концентраци-

ями  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в почвах, так и отличиями в накоплении урана и тория растениями. Среднее значение отношений концентраций  $^{230}\text{Th}$  к  $^{232}\text{Th}$  в продуктах животного происхождения по данным табл. 1 равно  $2.0 \pm 1.7$ , что достаточно хорошо согласуется с аналогичным отношением концентраций  $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$  в растениях [5] и соответствует данным НКДАР [6].

Как и уран, торий в значительной степени удерживается в скелете. Согласно данным работы [7], концентрации  $^{232}\text{Th}$  в костях крупного рогатого скота равны  $(4.5 \pm 2.2) \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса). Это значение было примерно в 5 раз вы-



**Рис. 1.** Распределение изотопов тория между органами бычков. По данным работы, % от содержания в организме [14].  
**Fig. 1.** Thorium isotope distribution between steers organs, % of the total content in the body. According to [14].

ше, чем средняя концентрация тория в мягких тканях животных ( $(0.9 \pm 0.2) \times 10^{-4}$  Бк/кг сырой массы) [7].

Несколько меньшие значения содержания изотопов тория в тканях КРС были получены на основе изучения поступления тяжелых естественных радионуклидов в ткани крупного рогатого скота, проведенного в районе повышенного содержания тория в почве штата Нью-Йорк [14]. Концентрации изотопов тория в почве региона исследований составляли 37.6, 43.0 и 38.4 Бк/кг (сухая масса) для  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{230}\text{Th}$  и  $^{228}\text{Th}$  соответственно. Средние концентрации  $^{232}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$  в тканях животных варьировали от  $0.6 \times 10^{-3}$  до  $2.4 \times 10^{-2}$  Бк/кг (сырая масса) и от  $1.3 \times 10^{-3}$  до 0.9 Бк/кг (сырая масса) соответственно. Наибольшие значения концентрации  $^{232}\text{Th}$  отмечены в костях (20<sup>1</sup>), за которыми следовали легкие (7), почки (5), печень (3) и, наконец, мышцы (1).

Основываясь на этих данных, Линсалата оценил распределение  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  между органами бычков [14] (рис. 1). Из данных рис. 1 видно, что изотопы тория накапливаются в основном в костях, затем в мышцах, в то время как накопление тория в легких, почках и печени является низким.

### СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В ТКАНЯХ ДИКИХ ЖИВОТНЫХ

В последние годы количество данных о концентрациях тория в диких видах животных значительно увеличилось. Следуя подходу, предложенному в публикации I08 МКРЗ [15] для референтных организмов, такая информация часто предоставляется на основе содержания радионуклидов в организме в целом, без дифференциации между различными тканями (табл. 2). В первую очередь это

связано с тем, что целью использования этой информации является оценка доз облучения биоты. В то же время в литературе имеются и работы, в которых проводится дифференция содержания тория между отдельными органами и тканями (табл. 2) [7, 16]. Важным выводом, следующим из этих исследований, является то, что общие закономерности распределения тория в тканях диких млекопитающих аналогичны закономерностям, отмеченным для домашних животных. Так, данные по содержанию  $^{232}\text{Th}$  в копытах, рогах, костях и мясе оленей в Сербии составили  $4.0 \times 10^{-2}$ ,  $3.3 \times 10^{-2}$ ,  $(3.1-8.3) \times 10^{-3}$  и  $1.6 \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса) соответственно, и они достаточно близки к содержанию тория в аналогичных тканях у крупного рогатого скота [16].

Наименьшие концентрации тория отмечены у млекопитающих, довольно низкие концентрации тория характерны для холоднокровных организмов – амфибий и рептилий, более высокие концентрации этого радионуклида отмечены в насекомых, птицах и дождевых червях (рис. 2).

Представленные выше данные для природных организмов даны для зоны умеренного климата, для районов с фоновым содержанием тория в почве. В работе [25] приведены данные о концентрации естественных радионуклидов в тканях животных, составляющих традиционную пищу аборигенов в районе реки Аллигатор в северной Австралии (рис. 3). Район исследований относится к тропической зоне Австралии с повышенным естественным радиоактивным фоном; району, в котором проводятся работы по добыче урана. Данные по концентрациям изотопов урана и тория были предоставлены для традиционных продуктов питания аборигенов (рыба, буйвол, свинья, гусь, полевая змея, гоанна<sup>2</sup>, черепаха и прес-

<sup>1</sup> Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в органах животных нормированы на концентрацию этого элемента в мышцах.

<sup>2</sup> Один из видов ящериц рода *Varanus*, обитающих в Австралии.

**Таблица 2.** Концентрации тория в тканях диких животных в районах фоновое содержания тория в окружающей среде, Бк/кг (сырая масса)**Table 2.** Thorium concentrations in wildlife tissues in background thorium areas, Bq/kg (fresh mass)

Вид	Ткани	Страна	<sup>230</sup> Th	<sup>232</sup> Th	Ссылки
Амфибия	Организм в целом	Россия		0.03	[17]
Амфибия (Лягушка)	Организм в целом	Англия		0.18	[18]
Амфибия	Организм в целом	Общее		0.018	[18]
Медведь	Кости	Сербия		$(3-10) \times 10^{-3}$	[16]
Медведь	Мышцы	Сербия		$1.6 \times 10^{-3}$	[16]
Птицы	Организм в целом	Сербия	0.03	0.2	[19]
Птицы	Организм в целом	Англия		0.069	[18]
Птицы (Хищные)	Организм в целом	Россия		$0.21 \pm 0.06$	[21]
Птицы (Насекомоядные)	Организм в целом	Россия		$0.15 \pm 0.09$	[21]
Олень	Мышцы	Сербия		$1.6 \times 10^{-3}$	[16]
Дождевые черви	Организм в целом	Финляндия		0.34	[22]
Дождевые черви	Организм в целом	Норвегия		0.155	[23]
Дождевые черви	Организм в целом	Англия		0.068	[18]
Насекомые	Организм в целом	Сербия	0.36	0.075	[20]
Млекопитающие	Организм в целом	Сербия	0.01	$3.2 \times 10^{-3}$	[20]
Млекопитающие	Организм в целом	Англия	$2.9 \times 10^{-3}$	$2.7 \times 10^{-3}$	[18]
Млекопитающие (Хищные)	Организм в целом	Россия		$0.51 \pm 0.11$	[24]
Млекопитающие (Травоядные)	Организм в целом	Россия		$0.31 \pm 0.2$	[24]
Рептилии	Организм в целом	Сербия	0.15	0.026	[20]
Грызуны	Организм в целом	Россия		$0.6 \pm 0.19$	[20]
Косуля	Мышцы	Германия	$(1.2 \pm 0.1) \times 10^{-3}$	$(6 \pm 1) \times 10^{-4}$	[7]

новодный крокодил), обитающих на этой территории.

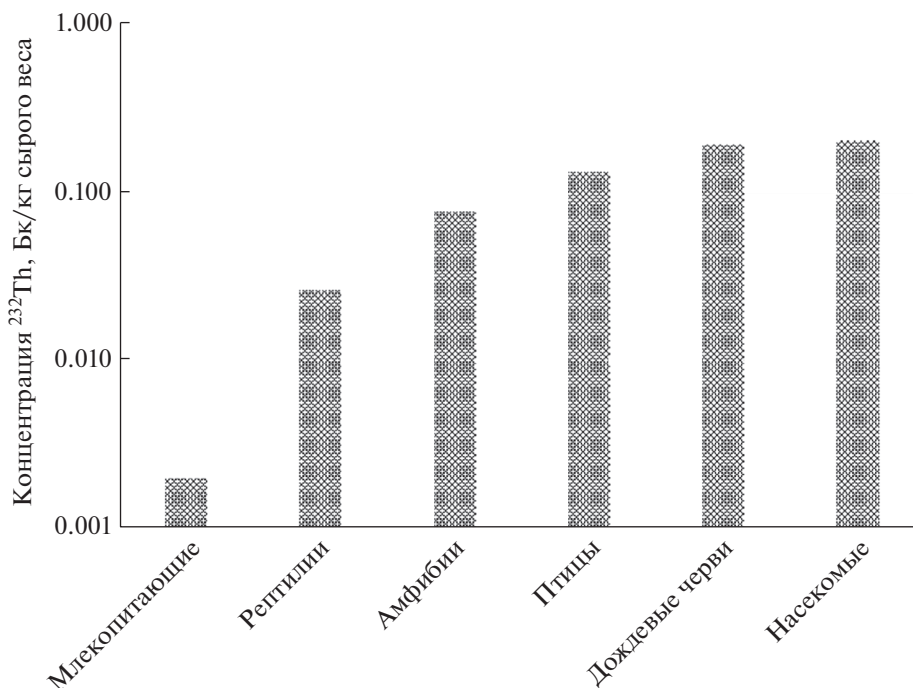
Концентрации <sup>230</sup>Th и <sup>232</sup>Th в мышцах изучаемых видов биоты варьировали от  $(2.0 \pm 3.0) \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса, водяной буйвол) до  $(1.6 \pm 1.0) \times 10^{-2}$  Бк кг<sup>-1</sup> (сырая масса, бородавчатая змея). Концентрации тория в мышцах черепахи, гуся, гоанны и дикой свиньи занимают промежуточное значение, тогда как концентрации <sup>232</sup>Th в печени черепахи ( $(3.8 \pm 4.0) \times 10^{-2}$  Бк/кг (сырая масса)) и костях и печени крокодила ( $(3.0 \pm 13.0) \times 10^{-2}$  Бк/кг (сырая масса)) были выше, чем в мышцах животных (рис. 3). В большинстве случаев концентрация <sup>230</sup>Th в тканях животных была выше, чем <sup>232</sup>Th, что связано с повышенным содержанием в поверхностных водах <sup>238</sup>U, являющегося материнским радионуклидом для <sup>230</sup>Th.

В работе [25] также представлена информация о концентрации тория в отдельных органах водяного буйвола, отобранных в районе реки Аллигатор (рис. 4). Наибольшие концентрации как <sup>230</sup>Th, так и <sup>232</sup>Th были обнаружены в языке животных, довольно высокие концентрации тория

были обнаружены в печени, сердце и почках, в то время как самые низкие значения были в мышцах животных.

Еще одним примером территорий с повышенным содержанием тория в природных организмах является Республика Коми Российской Федерации. Этот район хорошо известен благодаря радиоэкологическим исследованиям, направленным на изучение действия изотопов урана, тория и радия на окружающую среду. Вариабельность концентраций тория в почве этого региона довольно высока (от 60 до 1500 Бк/кг, сухой массы), что позволяет сравнить концентрации тория в организме животных в областях, близких к нормальному фону, с концентрациями тория в животных, обитающих в районах с повышенным содержанием тория (табл. 3) [21, 24]. В результате многолетних исследований, проведенных в этом регионе, получен большой массив данных о накоплении <sup>232</sup>Th у 43 видов дикой биоты [17, 21, 24].

Отмечено, что самые высокие концентрации активности тория наблюдались у насекомоядных (*Eulipotyphla*) и мелких грызунов, таких как крот, землеройка, тундровая полевка, а наиболее низ-



**Рис. 2.** Средние концентрации <sup>232</sup>Th в природных организмах, Бк/кг, сырая масса.  
**Fig. 2.** Mean <sup>232</sup>Th concentrations in biota species, Bq/kg, fresh mass.

кие концентрации  $(0.4-1.6) \times 10^{-1}$  Бк/кг, наблюдались у холоднокровных видов — лягушек и живородящих ящериц. Концентрации <sup>232</sup>Th в грызунах и мелких хищниках изменялась в пределах  $(0.8-8.6) \times 10^{-1}$  Бк/кг в зоне с фоновым содержанием тория в почве, и от 1.2 до 5.0 в зоне с повышенным содержанием тория в почве.

Содержание <sup>232</sup>Th в птицах варьирует в диапазоне  $(0.5-3.4) \times 10^{-1}$  Бк/кг (сырая масса) при среднем  $1.6 \times 10^{-1}$  Бк/кг. Наибольшие концентрации <sup>232</sup>Th были отмечены у сов (филин, уральская сова), за которыми следуют водоплавающие птицы (евразийский чирок, свиязь, большой крохаль), тетеревиные (глухарь, тетерев-косач, рябчик, белая куропатка) и, наконец, воробьиные [24].

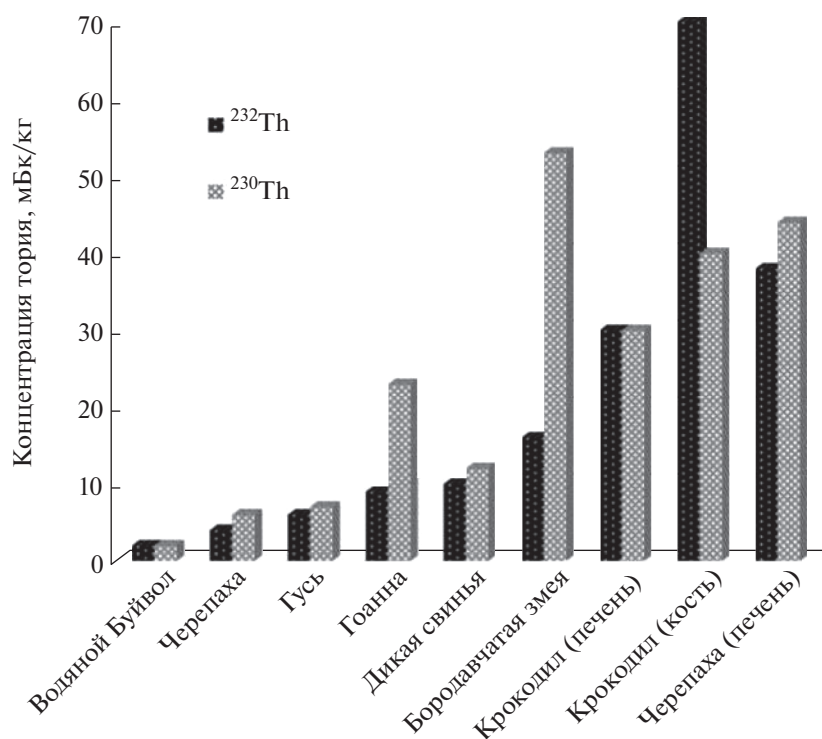
По накоплению <sup>232</sup>Th виды биоты могут быть представлены в виде ряда: насекомоядные грызуны > хищные млекопитающие > мелкие грызуны > травоядные животные > хищные птицы > насекомоядные птицы > рептилии > амфибии (рис. 5), что в целом согласуется с данными табл. 2. Концентрации <sup>232</sup>Th в видах биоты в районах, богатых торием, были выше, чем в аналогичных видах в областях с низким уровнем тория. Наблюдаемые различия между концентрациями <sup>232</sup>Th, отмеченные у одних и тех же видов животных, обитающих в районах с повышенным и естественным торие-

вым фоном, варьировали от  $1.2^3$  (европейская норка) до 45 (болотная лягушка).

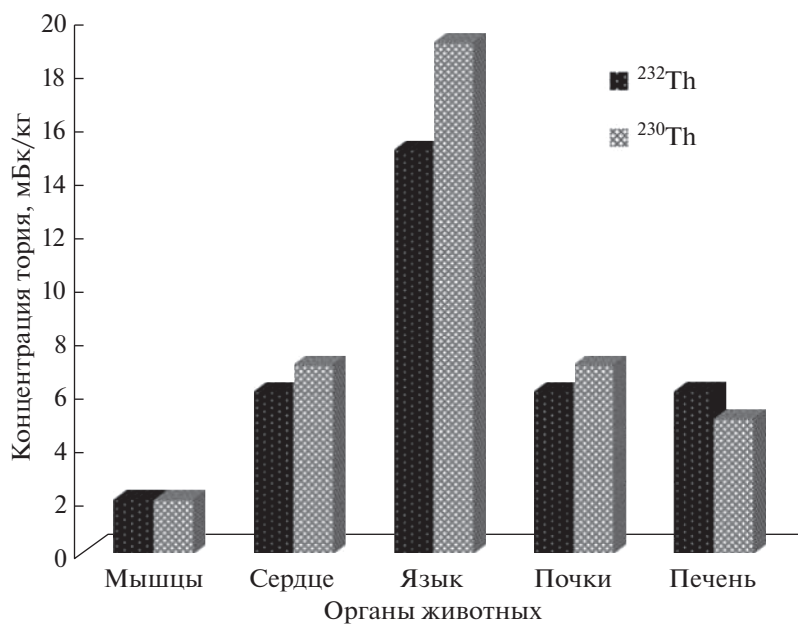
В то же время следует отметить отсутствие пропорциональности между концентрациями тория в животных и почве. Так, при отличии концентрации <sup>232</sup>Th в почвах районов нормального и повышенного фона более, чем в 10 раз, различие между средними концентрациями у млекопитающих грызунов составляет  $2.7 \pm 1.7$  раза, тогда как у наземных хищных животных эта величина была  $2.4 \pm 1.4$ . Для насекомоядных птиц отношение концентраций <sup>232</sup>Th, измеренных для района естественного фона к концентрациям тория, характерных для зоны повышенного фона, было равно  $2.4 \pm 1.4$ , тогда как для хищных птиц —  $8.1 \pm 2.0$ . Отмеченное отсутствие пропорциональности между концентрацией тория в биоте и почве связано, возможно, с пониженным накоплением тория растениями в зоне высоких концентраций тория в почве и особенностями питания различных видов животных.

Как для нормального ториевого фона, так и для территорий повышенного содержания тория в почвах отмечался эффект трофического накопления в пищевых цепочках, определяющий тен-

<sup>3</sup> Отношение средней концентрации тория в организме животных в районах с повышенным ториевым фоном к средней концентрации тория в организме животных, отобранных в районах с естественным ториевым фоном.



**Рис. 3.** Содержание  $^{232}\text{Th}$  и  $^{230}\text{Th}$  в тканях животных, обитающих в районе р. Аллигатор, Австралия.  
**Fig. 3.** Concentrations of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{230}\text{Th}$  in tissues of animals inhabiting the Alligator River area, Australia.



**Рис. 4.** Распределение  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  по органам водяного буйвола.  
**Fig. 4.** Distribution of  $^{230}\text{Th}$  and  $^{232}\text{Th}$  among water buffalo organs.

денцию более высокого накопления тория у хищных видов [24].

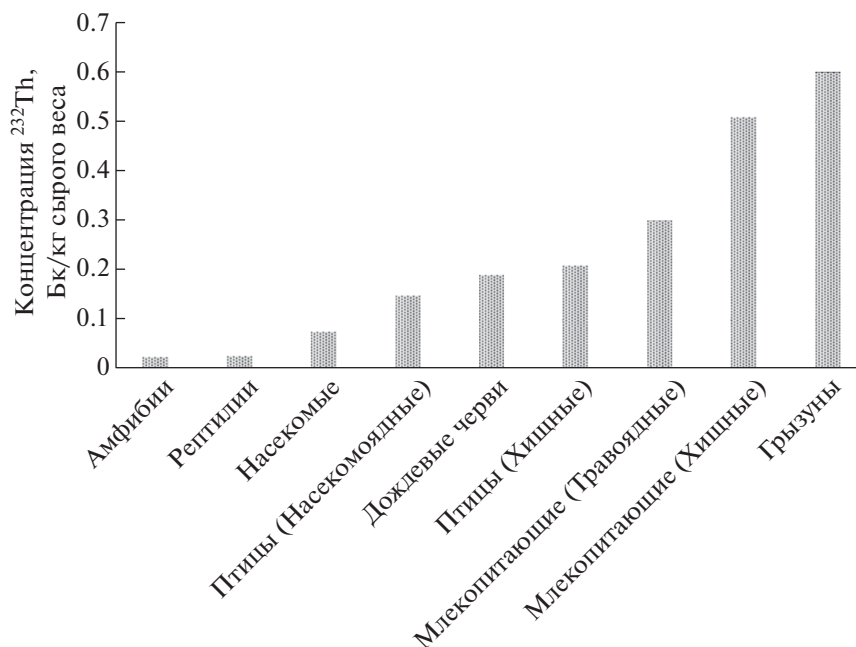
Данные по концентрациям  $^{232}\text{Th}$  в мышцах диких животных колебались от  $0.6 \times 10^{-3}$  Бк/кг для

мяса косули и от  $1.7 \times 10^{-1}$  до 2.3 Бк/кг для уральской неясоти. Таким образом концентрации активности  $^{232}\text{Th}$  в мясе животных, приведенные в настоящей работе, довольно близки к справочно-

**Таблица 3.** Концентрации тория в некоторых видах диких животных и птиц, обитающих в Республике Коми (Россия) (Бк/кг) [Маслов, 1973; Маслов, Маслова, 1972] (сырая масса)  
**Table 3.** Thorium concentrations in some wildlife species in the Komi region (Russia) with different levels of radiation background (Bq/kg) [17, 21, 24] (fresh mass)

Вид биоты	Фоновый район		Область высокого фона	
	№	<sup>232</sup> Th	№	<sup>232</sup> Th
Крот	36	0.86	49	1.97
Землеройка	94	0.82	56	1.56
Тундровая полевка	491	0.7	38	1.68
Тёмная полевка	68	0.62	7	0.86
Рыжая полевка	46	0.41	74	1.56
Водяная полевка	39	0.33	11	1.64
Белки	15	0.08	36	0.29
Бурундуки	18	0.45	5	0.74
Зайцы	12	0.41	14	1.1
Лось	2	0.33	0.53	
Северный олень	2	0.33	0.57	
Куница	12	0.49	8	1.15
Горностай	13	0.62	9	1.72
Ласка	5	0.66	10	1.97
Европейская норка	5	0.41	5	0.49
Выдра	6	0.49	9	0.66
Лиса	3	0.37	3	0.49
Живородящая ящерица	57	0.04		
Болотная лягушка	31	0.016	19	0.72
Западный глухарь	17	0.17	205	0.9
Тетерев	15	0.23	184	1.97
Рябчик	25	0.05	208	0.71
Глухарь	15	0.21	61	0.77
Евразийский чирок	7	0.34	5	1.23
Большой крохаль	4	0.27	4	1.6
Клёст-сосновик	18	0.08	41	0.26
Большая синица	15	0.06	19	0.28
Белая трясогузка	12	0.06	21	0.26
Снегирь	6	0.06	17	
Большой пёстрый дятел	12	0.12	6	0.33
Дятел	4	0.1	10	0.44
Тетеревятник	2	0.18	3	1.15
Ястреб-перепелятник	3	0.14	4	1.44
Филин	2	0.28	3	1.85





**Рис. 5.** Средние концентрации <sup>232</sup>Th в природных организмах, обитающих на территории Республики Коми (Россия), Бк/кг, сырой вес.

**Fig. 5.** Mean concentrations in natural organisms inhabiting the territory of the Komi Republic (Russia), Bq/kg, fresh mass weight.

му значению для референтной концентрации <sup>232</sup>Th в мясе, представленному в публикации НКДАР  $1.0 \times 10^{-3}$  Бк/кг [6].

В работе [23] приводятся данные о концентрациях <sup>232</sup>Th у дождевых червей, отобранных в области высокого природного ториевого фона в Норвегии, в которой концентрации тория в почве варьировали от 410 Бк/кг (ненарушенные земли) до 3870 Бк/кг в местах добычи тория. В районах расположения заброшенных шахт (участки техногенно-измененного естественного радиоактивного фона) эти значения составляли 2260 и 1765 Бк/кг (сухая масса).

Установлено, что наиболее высокие концентрации <sup>232</sup>Th, а именно —  $(1.9 \pm 1.5) \times 10^2$  и  $(4.5 \pm 3.7) \times 10^2$  Бк/кг наблюдаются у эндогенных дождевых червей (*A. caliginosa* и *A. rosea*), отобранных на участках техногенно-измененного естественного радиоактивного фона, где ранее осуществлялась добыча тория. Проводимые работы привели к нарушению структуры почвенных профилей и появлению большего количества частиц, обогащенных тяжелыми естественными радионуклидами, что способствовало их повышенному поступлению в организм эндогенных дождевых червей. Среди эпигамных видов (*D. rubidus* и *L. rubellus*) максимальные уровни <sup>232</sup>Th —  $(1.5 \pm 0.9) \times 10^2$  и  $(2.3 \pm 1.1) \times 10^2$  Бк/кг наблюдались у червей, отобранных за пределами антропогенно-нарушен-

ных областей, где высокая концентрация <sup>232</sup>Th была обнаружена как в поверхностном слое почвы, так и в корнях и опавших листьях (880–1700 Бк/кг).

#### СОДЕРЖАНИЕ ТОРИЯ В ПРЕСНОВОДНОЙ БИОТЕ

Данные по содержанию <sup>232</sup>Th в пресноводной биоте приведены в табл. 4. Информация о накоплении <sup>232</sup>Th в водной биоте водоемов, расположенных в регионах, обогащенных торием, выделена курсивом.

Большая часть доступных данных содержат информацию о содержании изотопов тория в рыбе, хотя некоторая ограниченная информация доступна для водных растений [26, 27]. Содержание тория в водной растительности (водоросли, водный мох) существенно выше, чем в рыбе и достигает  $5.7 \pm 9.3$  Бк/кг (сырая масса) [26].

Концентрация <sup>232</sup>Th в рыбе в областях с фоновым содержанием тория в природной среде варьирует в диапазоне  $1.3 \times 10^{-3}$ – $9.4 \times 10^{-2}$  Бк/кг (сырая масса). Среднее значение составляет  $2.1 \times 10^{-2}$  Бк/кг, что примерно в 2 раза выше референтного значения предложенного НКДАР [6]. Существенно более высокие значения (0.21–5.8) Бк/кг (сырая масса) отмечены в районах с высоким содержанием тория в окружающей среде, в частности, в районах, где ведутся открытые разработки

**Таблица 4.** Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в пресноводной биоте, Бк/кг (сырая масса)  
**Table 4.** Concentrations of  $^{232}\text{Th}$  in freshwater biota species, Bq/kg (fresh mass)

Виды	Страна	Комментарий	$^{232}\text{Th}$	Ссылки
Территории с фоновым содержанием тория в окружающей среде				
Водные растения	Франция	Средние данные	$5.7 \pm 9.3$	[26]
Бурые водоросли	Англия	Средние данные	$4.3 \times 10^{-2}$	[27]
Рыба	Португалия	р. Тавора, Вуга, Дао	$(8.0 \pm 3.0) \times 10^{-3}$	[28]
Рыба	Россия	Средние данные	$(4.1-9.4) \times 10^{-2}$	[24]
Рыба	США	Озеро Мичиган	$(2.4 \pm 0.5) \times 10^{-2}$	[29]
Рыба	США	Озеро Мичиган	$(4.9 \pm 1.6) \times 10^{-2}$	[29]
Рыба	США	Озеро Эри	$2.8 \times 10^{-2}$	[29]
Рыба (форель)	Англия	Средние данные	$1.8 \times 10^{-2}$	[27]
Рыба (окунь)	США	Озеро Мичиган	$(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-3}$	[29]
Форель	Канада	Средние данные	$(9.0 \pm 14) \times 10^{-2}$	[29]
Территории с повышенным содержанием тория в окружающей среде				
Водный мох (сухая масса)	Португалия	Средние данные	$1.7 \pm 0.1$	[30]
Рыба	Португалия	р. Мондего	$(2.1 \pm 1.4) \times 10^{-2}$	[28]
Рыба	Австралия	р. Аллигатор	$(1.0-45.0) \times 10^{-3}$	[25]
Мидии	Австралия	р. Аллигатор	$(2.0 \pm 0.8) \times 10^{-1}$	[31]
Рыба	Нигерия <sup>2</sup>	р. Бисичи	$(5.8 \pm 0.2) \times 10^{-1}$	[32]
Рыба	Индия	р. Кунши	$(4.0 \pm 3.1) \times 10^{-2}$	[13]
Рыба	СССР	Республика Коми	0.3–1.97	[25]

по добыче тория, урана, редкоземельных металлов и олова.

Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в различных видах рыбы существенно варьируют, отражая особенности поведения и пищевые привычки рыбы, а также особенности загрязнения водоемов изотопами тория. В качестве примера, иллюстрирующего вариабельность содержания тория в рыбе водоемов зоны умеренного климата (Республика Коми) северного полушария и тропической зоны Австралии (район р. Аллигатор) Южного полушария, на рис. 6 и 7 приведены данные о содержании тория в рыбе, специфичной для этих районов.

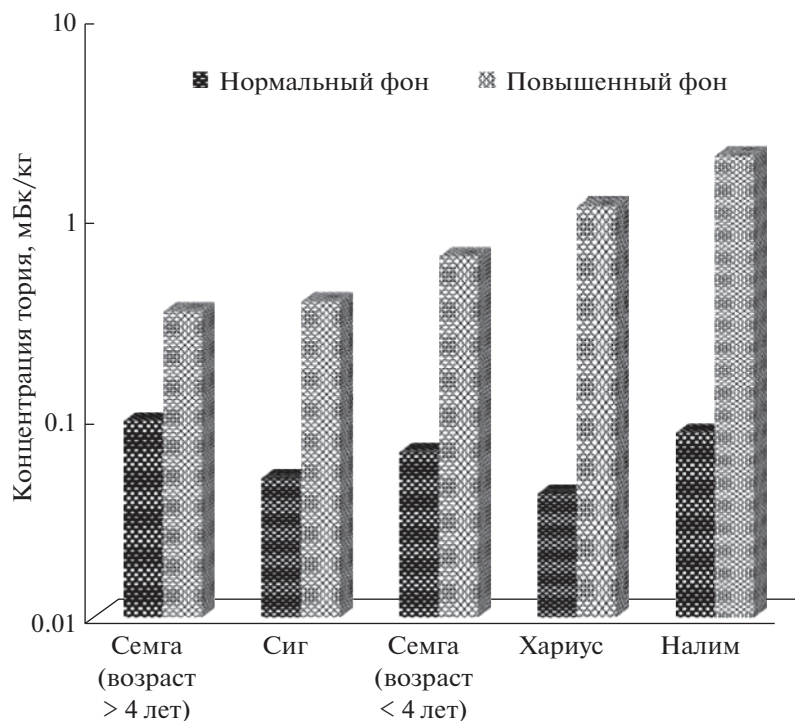
Из рис. 6 видно, что средние значения содержания  $^{232}\text{Th}$  в рыбе водоемов зоны фонового содержания тория в окружающей среде варьируют в достаточно узком диапазоне от  $4.1 \times 10^{-2}$  в хари-

усе до  $9.4 \times 10^{-2}$  Бк/кг (сырая масса) во взрослых особях семги. Концентрации тория в пробах рыбы, отобранных в зоне с высоким ториевым фоном (Республика Коми), были примерно на два порядка величины выше и находились в диапазоне от 0.3–2.0 Бк/кг (сырая масса).

Как уже отмечалось, Республика Коми является примером региона повышенного ториевого фона, тогда как р. Аллигатор иллюстрирует особенности загрязнения водных стоков выбросами уранового производства.

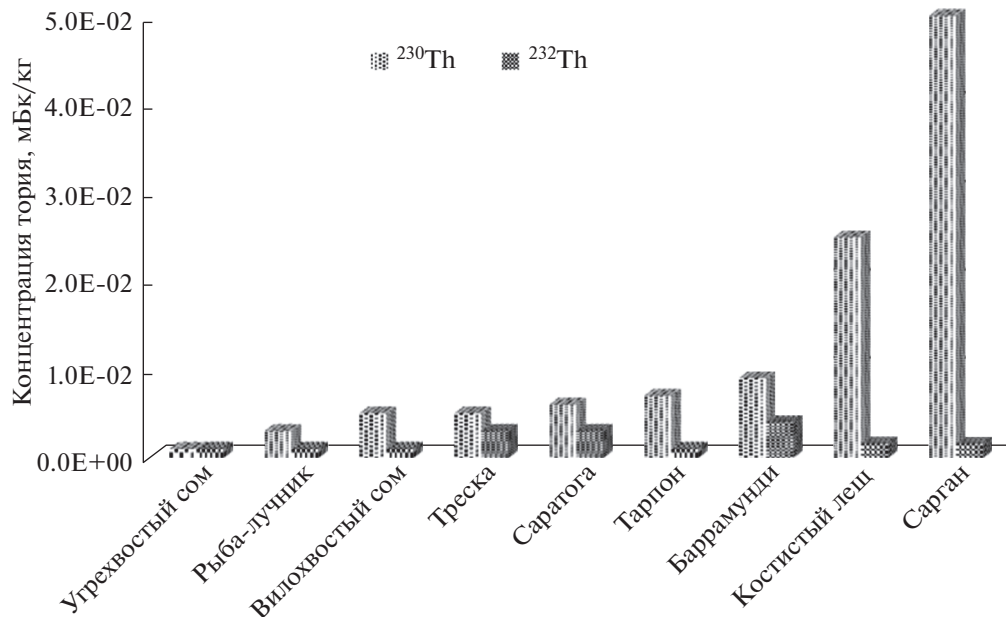
Сравнительные данные о содержании двух изотопов тория, которые принадлежат цепочкам распада  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  в мягких тканях рыб р. Аллигатор (Северная Австралия), приведены на рис. 7.

Концентрация изотопов тория в нефильтрованной воде в районе исследований варьирует от



**Рис. 6.** Содержание  $^{232}\text{Th}$  в рыбе водоемов районов нормального и повышенного содержания тория в окружающей среде.

**Fig. 6.** Concentrations of  $^{232}\text{Th}$  in fish of water bodies located in areas with normal and elevated environmental thorium levels.



**Рис. 7.** Содержание  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  в мягких тканях рыбы реки Алигатор, Австралия.

**Fig. 7.** Concentrations of  $^{230}\text{Th}$  and  $^{232}\text{Th}$  in soft tissues of the Alligator River fish, Australia.

0.29 до 22 мБк/л и от 0.11 до 7.9 мБк/л для  $^{230}\text{Th}$  и  $^{232}\text{Th}$  соответственно, в зависимости от места расположения поступления в реку сточных вод ура-

нового производства. Концентрации  $^{232}\text{Th}$  в мягких тканях рыбы варьировали от  $1.0 \times 10^{-3}$  до  $4.0 \times 10^{-3}$  Бк/кг (сырая масса), тогда как содержа-

ние  $^{230}\text{Th}$  в рыбе было примерно в 10 раз больше, отражая более высокие концентрации это радионуклида в водной среде.

Представленные результаты измерения изотопов тория в рыбе (Республика Коми, Россия) и мягких тканях рыбы в целом согласуются с данными табл. 4, показывающими, что в условиях нормального фона концентрация  $^{232}\text{Th}$  в рыбе может достигать  $1.0 \times 10^{-1}$  Бк/кг (сырая масса), а в районах высокого ториевого фона эта величина может быть до 100 раз выше.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрации  $^{232}\text{Th}$  как в наземных, так и пресноводных организмах изменяются в широких пределах, отражая концентрации тория в окружающей среде. Концентрации тория в тканях наземных животных варьируют от  $0.9 \times 10^{-4}$  до 0.86 Бк/кг (сырая масса) для регионов с нормальным ториевым фоном и от  $3.1 \times 10^{-2}$  до 1.97 Бк/кг для районов с высокими концентрациями тория в почве (ториевые провинции) или антропогенно-нарушенных территорий. Торий в основном накапливается в костной ткани животных. У млекопитающих наибольшие значения концентрации  $^{232}\text{Th}$  отмечены в скелете, за которыми следовали легкие, почки, печень и, наконец, мышцы. Содержание тория в тканях диких животных варьирует от 0.016 до 0.86 Бк/кг в зонах нормального техногенного фона и от 0.2 до 2.3 Бк/кг на территориях, обогащенных торием. Отмечена тенденция к более высокому накоплению тория в видах, занимающих более высокое положение в трофических цепях. Концентрации тория в рыбе несколько выше, чем тканей наземных животных. В условиях нормального фона концентрация  $^{232}\text{Th}$  в рыбе может достигать  $1.0 \times 10^{-1}$  Бк/кг (сырая масса), а в районах высокого ториевого фона эта величина может быть до 100 раз выше. В целом полученные результаты показывают важность изучения переноса тория по пищевым цепочкам и необходимость учета изученных закономерностей при оценке последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают свою признательность анонимным рецензентам за тщательное прочтение рукописи и ценные советы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Исамов Н.Н., Фесенко С.В.* Анализ закономерностей всасывания радионуклидов в желудочно-кишечном тракте сельскохозяйственных животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 1. С. 87–104. [*Isamov N.N., Fesenko S.V.* Analysis of Data on the Radionuclide Adsorption in the Gastrointestinal Tract of Farm Animals // Radiacionnaya biologiya. Radiojekologiya. 2021. V. 61. № 1. P. 87–104. (In Russ.)]
2. International Commission on Radiological Protection. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides, part 2 – ingestion dose coefficients. Annals of the ICRP. ICRP Publication 67. Annals of the ICRP 23, (3/4). Oxford: Pergamon Press, 1993.
3. *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.: Наука, 1990. 368 p. (In Russ.)].
4. *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. Radiojekologiya. 2020. V. 60. № 5. P. 542–555. (In Russ.)]
5. *Фесенко С.В., Емлютина Е.С.* Концентрация тория в растениях: обзор мировых данных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 4. С. 441–452 [*Fesenko S.V., Emlutina E.S.* Thorium concentrations in the environment: a review of the world data // Radiacionnaya biologiya. Radiojekologiya. 2022. V. 62. № 4. P. 441–452 (In Russ.)]
6. 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.
7. *Haas G., Schuppfner R., Muller A.* Transfer of natural and manmade radionuclides from plants to roe deer and farm animals // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1995. V. 194. P. 269–276.
8. *Linsalata P.I., Morse R., Ford H., Eiesenbud M.* Transport pathways of Th, U, R and La from soil to cattle tissues // J. Environ. Radioact. 1989. V. 10. P. 115–140.
9. *Pietrzak-Flis Z., Rosiak L., Suplinska M.M. et al.* Dietary intake of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$  and  $^{226}\text{Ra}$  in the adult population of central Poland // Sci. Total. Environ. 2001. V. 273. P. 163–169.
10. *Pietrzak-Flis Z., Suplinska M.M., Rosiak L.* The dietary intake of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{228}\text{Th}$  and  $^{226}\text{Ra}$  from food and drinking water by inhabitants of the Waibrzych region // J. Radioanal. Nucl. Chem. 1997. V. 222. P. 189–193.
11. *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.
12. *Giri S., Singh G., Jha V.N., Tripathi R.M.* Risk assessment due to ingestion of natural radionuclides and heavy metals in the milk samples: a case study from a proposed uranium mining area, Jharkhand // *Environ. Monit. Assess.* 2011. V. 175. P. 157–166.
  13. *Jha S.K., Gothankar S., Longwai P.S. et al.* Intake of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  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.
  14. *Linsalata P.* Uranium and Thorium Decay Series Radionuclides in Human and Animal Foodchains—A Review // *J. Environ. Quality.* 1994. V. 23. № 4. P. 633–642.
  15. International Commission on Radiological Protection. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP. 38. Oxford, UK: Elsevier Science Ltd.
  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, Bombay, 1981 (Conference proceedings). Bombay: Bhabha Atomic Research Centre, 1982; P. 36–37.
  17. *Маслов В.И., Маслова К.И.* Радиоэкологические группы млекопитающих и птиц биогеоценозов районов повышенной естественной радиоактивности // Радиоэкологические исследования в природных биогеоценозах. М.: Наука, 1972. С. 100–101 [*Maslov V.I., Maslova K.I.* Radiojekologicheskie grupy mlekopitajushhih i ptic biogeocenzov rajonov povshennoy estestvennoy radioaktivnosti // Radiojekologicheskie issledovanija v prirodnyh biogeocenzah. М.: Nauka, 1972. P. 100–101 (In Russ.)]
  18. *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.
  19. *Hosseini A., Beresford N.A., Brown J.E. 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.
  20. *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. 1–7.
  21. *Маслов В.И., Маслова К.И.* Накопление урана, тория и радия животными радиоэкологической группы тесного контакта с радиоактивностью в местах их обитания // Теоретические и практические аспекты воздействия малых доз ионизирующего излучения. Сыктывкар: Коми филиал АН СССР, 1973. С. 100–101 [*Maslov V.I., Maslova K.I.* Accumulation of uranium, thorium and radium by animals of radioecological group of close contact with radioactivity in their habitats // Theoretical and practical aspects of effects of low doses of ionizing radiation. Syktyvkar: Komi Branch of Academy of Science of USSR, 1973. P. 100–101.
  22. *Tuovinen T., Kasurinen A., Häikiö E. et al.* Transfer of elements relevant to nuclear fuel cycle from soil to boreal plants and animals in experimental meso- and microcosms // *Sci. Total. Environ.* 2016. V. 539. P. 252–261.
  23. *Popic J.M., Salbu B., Skipperud L.* Ecological transfer of radionuclides and metals to free-living earthworm species in natural habitats rich in NORM // *Sci. Total Environ.* 2012. V. 414. P. 167–176.
  24. *Таскаев А.И., Титаева Н.А., Алексахин Р.М., Поликарпов Г.Г.* Распределение и миграция естественных радионуклидов в природных биогеоценозах // Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере / Алексахин Р.М. (ред.). М.: Наука, 1990. С. 15–73. [*Taskaev A.I., Titaeva N.A., Alexakhin R.M., Polikarpov G.G.* Raspredelenie i migracija estestvennyh radionuklidov v prirodnyh biogeocenzah // Tyazhelye estestvennye radionuklidy v biosfere / Alexakhin R.M. (Ed.). М.: Nauka, 1990. P. 15–73. (In Russ.)].
  25. *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.
  26. *Lambrechts A., Foulquier L., Garnier-Laplace J.* Natural radioactivity in the aquatic components of the main French rivers // *Radiat. Prot. Dosim.* 1992. V. 45. P. 253–256.
  27. *Beresford N.A.* Assessment of naturally occurring radionuclides around England and Wales, Science Report: SC030283/SR, U.K. Environment Agency (2007).
  28. *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.
  29. *Lucas H.F. jr., Edgington D., Colby P.J.* Concentrations of Trace Elements in Great Lakes Fishes // *J. Fisher. Res. Board Canada.* 1970. V. 27. № 4. P. 677–684.
  30. *Pratas J., Favas P.J.C., Varun M. et al.* Distribution of rare earth elements, thorium and uranium in streams and aquatic mosses of Central Portugal // *Environ. Earth. Sci.* 2017. V. 76. P. 156.
  31. *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.
  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.

## Thorium Concentrations in Terrestrial and Freshwater Organisms: A Review of the World Data

S. V. Fesenko<sup>a,#</sup> and E. S. Emlyutina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: Corwin\_17F@mail.ru*

An overview of data on thorium concentrations in terrestrial animals, as well as freshwater organisms is presented. Concentrations of <sup>232</sup>Th in both animals and fish vary widely, reflecting environmental thorium concentrations. Thorium concentrations in the regions with a normal thorium background in animal tissues were in a range from  $0.9 \times 10^{-4}$  to  $2.1 \times 10^{-2}$  Bq/kg, and from  $3.1 \times 10^{-2}$  to  $1.4 \times 10^{-1}$  Bq/kg in the areas with high thorium concentrations in the soil. Significantly higher values were observed in wild animals' tissues. The highest <sup>232</sup>Th concentrations were found to be in the skeleton, followed by lungs, kidneys, liver and finally muscles. It has been shown that thorium accumulation is higher in species occupying a higher position in the trophic chains. In areas with normal thorium background, the concentration of <sup>232</sup>Th in fish can reach  $1.0 \times 10^{-1}$  Bq/kg (fresh mass), and in areas of high thorium background this value can be up to 100 times higher. The obtained results show the importance of study on the thorium transfer along the food chains and the need to consider observed regularities when assessing the consequences of radioactive contamination of the environment.

**Keywords:** thorium, uranium, review, animals, animal products, freshwater fish