

УДК 539.163:599.323.4:616.71:57.084.2:614.876

АККУМУЛЯЦИЯ ^{90}Sr У ГРЫЗУНОВ ИЗ ЗОНЫ ВОСТОЧНО-УРАЛЬСКОГО РАДИОАКТИВНОГО СЛЕДА: ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ КОСТИ

© 2018 г. В. И. Стариченко*

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

*E-mail: starichenko@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 31.01.2017 г.

Исследовали уровень аккумуляции ^{90}Sr в костной ткани двух видов мышевидных грызунов: мышь полевая (*Apodemus agrarius* Pall., 1771) и малая лесная мышь (*Sylvaeetus uralensis* Pall., 1811), обитающих в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа с плотностью загрязнения ^{90}Sr 0.074–3.7 и 3.7–18.5 МБк/м² (2–100 и 100–500 Ки/км² – периферия и эпицентр соответственно), в зависимости от минеральной плотности костной ткани. Выявлена обратная зависимость удельной активности ^{90}Sr и минеральной плотности кости (эпицентр: малые лесные мыши – $r = -0.42$, $p = 0.0001$, полевые мыши – $r = -0.44$, $p < 0.0001$; периферия: малые лесные мыши – $r = -0.21$, $p = 0.0024$). Проведено сравнение с данными лабораторных экспериментов на линейных мышах (однократное введение ^{90}Sr) ($r = -0.80$ – -0.88 , $p < 0.0001$). Обсуждаются возможные причины повышенной аккумуляции ^{90}Sr у отдельных особей.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС), мышевидные грызуны, ^{90}Sr , костная ткань, минеральная плотность костной ткани

DOI: 10.7868/S0869803118020091

Остеотропные радионуклиды, в частности ^{90}Sr , занимают важнейшее место в ряду техногенных поллютантов. Их характерной особенностью является избирательная аккумуляция в скелете, где накапливается до 90% поступившего в кровоток вещества [1]. Прочно связываясь с костными поверхностями или проникая внутрь кости, они остаются в костной ткани на продолжительный срок и являются источником пролонгированного облучения организма.

Поведение остеотропных радионуклидов в организме позвоночных к настоящему времени изучено достаточно подробно [1–9]. Показано, что в условиях естественного хронического поступления ^{90}Sr при обитании животных на радиоактивно загрязненных территориях его кинетика зависит как от экзогенных факторов (уровень загрязнения территории обитания, год и сезон отлова), так и от эндогенных параметров (вид, пол, возраст, морфофизиологические характеристики организма). Считается, что при этом определяющими являются экзогенные факторы; влияние эндогенных параметров изучено в значительно меньшей степени.

Изучение влияния эндогенных параметров в лабораторных экспериментах показало, что кинетика остеотропных веществ в организме позвоночных зависит от морфофизиологических факторов

самого организма, которые представляют собой физиологические процессы, физико-химические реакции и морфологические структуры [1, 6, 10]. Через систему морфофизиологических факторов опосредуется влияние других процессов жизнедеятельности и внешней среды (вида, пола, возраста, физиологического состояния организма). Влияние экзогенных воздействий осуществляется опосредованно, через изменение эндогенных параметров.

Один из важнейших факторов, влияющих на метаболизм остеотропных радионуклидов, – минеральная насыщенность кости [11–15]. Кость состоит из органической и минеральной фракций. Богатая органикой молодая недообызвествленная кость более проницаема для остеотропных радионуклидов, которые затем фиксируются в минеральной фракции. В лабораторном эксперименте на линейных мышах СВА при однократном введении ^{90}Sr была изучена зависимость величины накопления радионуклида от минеральной плотности скелета и показана их обратная корреляция [16]. В то же время количественная взаимосвязь этих показателей у животных из природной загрязненной среды, в организм которых ^{90}Sr поступает с пищей в течение всей жизни, исследована слабо, так как на влияние внутренних факторов внимания обращают мало. Предполагается, что обусловленные

эндогенными факторами закономерности накопления радионуклидов должны слабо проявляться на фоне значительных экзогенных воздействий. Например, на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) на участках размером 0.2–0.5 км² разброс в плотностях загрязнения почв ⁹⁰Sr составляет 1.2–2.7 раз [17]. В то же время, несмотря на выраженную мозаичность загрязнения биоценоза на территории ВУРСа, затрудняющую оценку роли эндогенных факторов, указание на связь накопления ⁹⁰Sr и минерализации скелета имеется в работе [7].

В настоящее время одним из основных дозобразующих радионуклидов на ВУРСе является β-излучатель ⁹⁰Sr (вместе с дочерним ⁹⁰Y). Радиохимическим методом было показано, что 90–95% ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y у позвоночных животных, обитающих на территории ВУРСа, депонировано в костной ткани [18]. Поэтому правомерно отождествлять величину β-активности скелета и содержание в нем этих радионуклидов. Для простоты изложения под активностью ⁹⁰Sr мы подразумеваем активность, обусловленную ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y.

Цель работы – исследование взаимосвязи депонирования ⁹⁰Sr в скелете мелких млекопитающих, обитающих в зоне ВУРСа, и минеральной плотности костной ткани в сравнении с данными лабораторных экспериментов на линейных мышцах при однократном введении радионуклида.

Подтверждение закономерностей аккумуляции ⁹⁰Sr, выявленных в строго контролируемых условиях лабораторного эксперимента при однократном поступлении радионуклида, у полевых животных будет способствовать дальнейшему пониманию особенностей формирования дозовых нагрузок на скелет и целостный организм в радиоактивном биогеоценозе в условиях хронического поступления ⁹⁰Sr. Это связано с тем, что изменение минеральной плотности кости, трансформируя задержку ⁹⁰Sr, оказывает влияние на поглощенную тканевую дозу. Материалы исследования позволят решить вопрос о радиобиологической значимости вклада этого фактора.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Исследовали удельную активность ⁹⁰Sr в костной ткани мелких млекопитающих, отловленных в разные годы (2005 – в сентябре; 2009, 2011, 2012 – в июле) на территории ВУРСа, с плотностью загрязнения ⁹⁰Sr 0.074–3.7 (периферия, ВУРС-0) и 3.7–18.5 (эпицентр, ВУРС-1) МБк/м² (2–100 и 100–500 Ки/км² соответственно) [19]. Исследованные животные представлены двумя видами: мышью полевая (*Apodemus agrarius* Pall., 1771) (*n* = 127) и малая лесная мышь (*Sylvaemus uralensis* Pall., 1811) (*n* = 291). В выборках животных, отловленных в разные годы, на фоне преобладания особей этого

года рождения в небольшом количестве встречались и перезимовавшие особи (менее 10%).

Радиометрию проб осуществляли на приборе бета-счета VAG-120 (VEB RFT Messelektronik, Германия). Для расчета удельной активности образцов (⁹⁰Sr + ⁹⁰Y) (Бк/г золы) градуировку прибора производили по серии калийных эталонов [20].

Минеральная плотность костной ткани – это количество минералов в расчете на единицу объема или площади кости. В лабораторных исследованиях одним из показателей минеральной плотности кости является коэффициент озоления (отношение массы золы к сырой массе кости).

Для радиометрии и анализа минеральной плотности костной ткани использовали бедренную кость, так как принято считать, что у мелких грызунов она репрезентативно отражает процессы, протекающие в целостном скелете [6, 21].

Учитывая, что половые различия в накоплении ⁹⁰Sr отсутствуют или незначительны [1, 9, 22], выборки по полу объединены. Календарный возраст животных не определяли. Однако известно, что повышение возраста влечет за собой увеличение массы тела [23]. Для выявления динамики коэффициента озоления и накопления ⁹⁰Sr по мере роста животных все животные по массе тела разделены на три условные группы: 1 группа – до 10 г, 2 – от 10 до 20 г и 3 – более 20 г.

Использованные нами группы лишь условно отражают динамику возраста, так как установлено, что масса тела мышевидных грызунов зависит от срока их рождения, и животные одного возраста, но разных сроков рождения могут иметь разную массу тела [24, 25]. Половозрелых животных этого года рождения и перезимовавших объединили, так как они находятся в одной и той же фазе жизненного цикла: завершили рост и развитие, приступили к воспроизводству – и идентичны физиологически [26], т.е. биологический (не календарный) возраст аппроксимирован массой тела.

Статистическая обработка данных выполнена с помощью пакета программ Microsoft Excel 2002 и Statistica 6.0 (StatSoft Inc.). Для анализа связи между удельной активностью ⁹⁰Sr и минеральной плотностью кости использовали линейный коэффициент корреляции Пирсона. Статистический вывод осуществляли на 5%-ном уровне значимости (*p* < 0.05).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице представлены масса тела, коэффициент озоления и удельная активность ⁹⁰Sr в костной ткани животных, обитающих на территории ВУРСа. У животных обоих видов наблюдается закономерное увеличение коэффициента озоления

Динамика минеральной плотности скелета и накопления ^{90}Sr в костной ткани животных, отловленных на территории ВУРСа, в зависимости от увеличения их массы тела ($M \pm m$)

Зона отлова	Вид (год)	Группа	n	Масса тела, г	k озоления	^{90}Sr , Бк/г золы
ВУРС-0 (0.074–3.7 МБк/м ²)	Малая лес- ная мышь (2009)	1	7	7.9 ± 0.5 (6.7–9.3)*	0.26 ± 0.03 (0.17–0.36)	139 ± 29 (38–249)
		2	58	14.6 ± 0.3 (10.1–19.2)	0.42 ± 0.01 (0.28–0.58)	126 ± 9 (54–450)
		3	22	24.3 ± 0.7 (20.0–31.8)	0.46 ± 0.01 (0.34–0.57)	85 ± 9 (18–199)
		Среднее по всей выборке	87	16.5 ± 0.6 (6.7–31.8)	0.42 ± 0.01 (0.17–0.58)	117 ± 7 (18–450)
	Малая лес- ная мышь (2011)	1	26	8.8 ± 0.2 (6.4–9.7)	0.38 ± 0.01 (0.30–0.45)	75 ± 5 (41–144)
		2	59	14.2 ± 0.3 (10.1–18.6)	0.44 ± 0.01 (0.35–0.49)	60 ± 3 (24–136)
		3	12	23.5 ± 0.5 (20.7–26.3)	0.51 ± 0.01 (0.46–0.55)	55 ± 9 (17–133)
		Среднее по всей выборке	97	13.9 ± 0.5 (6.4–26.3)	0.43 ± 0.01 (0.30–0.55)	63 ± 3 (17–144)
	Малая лес- ная мышь (2012)	1	2	9.9, 9.9	0.35, 0.43	69, 81
		2	20	14.6 ± 0.5 (10.2–19.2)	0.45 ± 0.01 (0.36–0.50)	71 ± 6 (29–132)
		3	5	22.4 ± 0.7 (20.9–24.7)	0.51 ± 0.02 (0.46–0.55)	41 ± 6 (27–61)
		Среднее по всей выборке	27	15.7 ± 0.8 (9.9–24.7)	0.45 ± 0.01 (0.35–0.55)	66 ± 5 (27–132)
ВУРС-1 (3.7– 18.5 МБк/м ²)	Мышь по- левая (2005)	1	12	8.7 ± 0.2 (7.5–10.0)	0.29 ± 0.02 (0.20–0.40)	474 ± 47 (230–748)
		2	78	13.6 ± 0.2 (10.1–19.7)	0.38 ± 0.01 (0.26–0.54)	284 ± 19 (57–875)
		3	37	28.7 ± 0.6 (21.5–37.6)	0.47 ± 0.01 (0.34–0.59)	225 ± 17 (55–390)
		Среднее по всей выборке	127	17.7 ± 0.7 (7.5–37.6)	0.40 ± 0.01 (0.20–0.59)	285 ± 14 (55–875)
	Малая лес- ная мышь (2005)	1	3	8.8, 9.1, 9.9	0.28, 0.31, 0.35	533, 848, 1189
		2	59	16.4 ± 0.3 (10.1–19.8)	0.40 ± 0.01 (0.21–0.52)	292 ± 21 (127–900)
		3	18	23.0 ± 0.5 (20.5–27.4)	0.46 ± 0.01 (0.38–0.52)	231 ± 42 (31–647)
		Среднее по всей выборке	80	17.7 ± 0.4 (8.8–27.4)	0.41 ± 0.01 (0.21–0.52)	299 ± 23 (31–1189)

В скобках – диапазон значений.

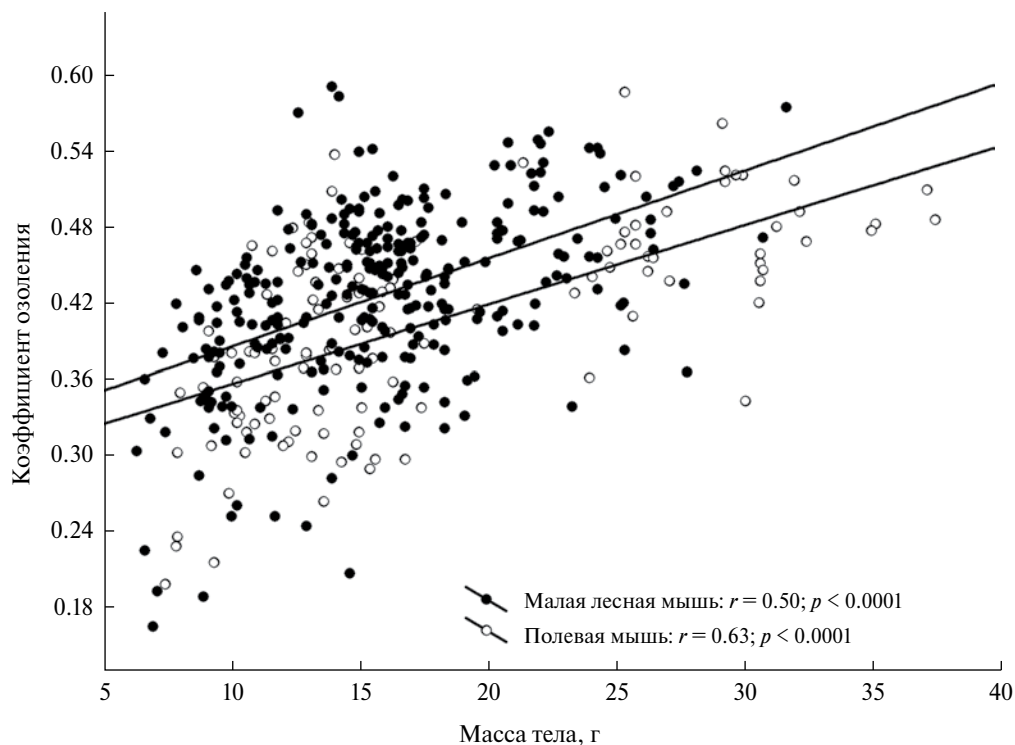


Рис. 1. Коэффициент озоления кости в зависимости от массы тела животных двух видов, отловленных на территории ВУРСа.

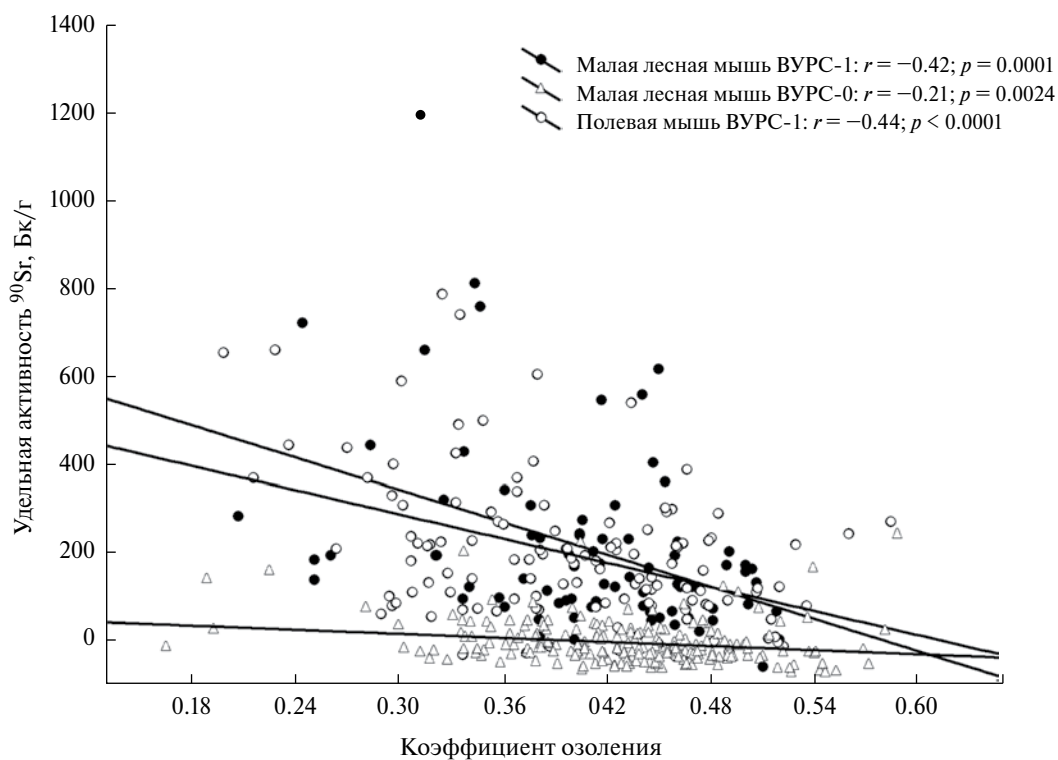


Рис. 2. Удельная активность ^{90}Sr в зависимости от коэффициента озоления костной ткани у животных двух видов, отловленных в эпицентре и на периферии ВУРСа.

с увеличением массы тела, свидетельствующее об увеличении зольности костей.

Коэффициент корреляции минеральной плотности кости и массы тела составляет для полевой мыши 0.63 ($p < 0.0001$), для малой лесной мыши — 0.50 ($p < 0.0001$) (рис. 1). В литературе исследований динамики изменения минеральной плотности костной ткани мышевидных грызунов нами не встречено. Так как масса минеральных веществ в кости и общая масса костной ткани в период роста изменяются пропорционально [13], то по аналогии с результатами исследований, проводимых на человеке, биологический возраст априори может быть аппроксимирован минеральной плотностью костной ткани.

На рис. 2 представлена зависимость удельной активности ^{90}Sr от минеральной плотности скелета у двух видов грызунов, отловленных в эпицентре (3.7–18.5 МБк/м²) и на периферии (0.074–3.7 МБк/м²) ВУРСа. Четко выраженные различия в уровне накопления ^{90}Sr у животных, отловленных в разных зонах ВУРСа, хорошо укладываются в современные представления о корреляции депонирования ^{90}Sr в скелете в зависимости от загрязнения почвы [27–29] и свидетельствуют об относительной оседлости населения.

Корреляционная связь удельной активности ^{90}Sr и минеральной плотности кости составляет в эпицентре для малых лесных мышей -0.42 ($p = 0.0001$), для полевых мышей -0.44 ($p < 0.0001$); на периферии для малых лесных мышей -0.21 ($p = 0.0024$). Более низкая обусловленность аккумуляции ^{90}Sr минеральной плотностью кости на периферии связана с тем, что здесь идет более интенсивное, чем по оси следа, перемешивание животных с мигрантами из сопредельной контрольной зоны [29]. Для объединенной выборки животных ($n = 418$) коэффициент корреляции удельной активности ^{90}Sr и минеральной плотности скелета составляет -0.37 ($p < 0.0001$). Т. е. эффект одного из эндогенных факторов — минерализации костной ткани — оказался высоко значимым в накоплении ^{90}Sr в организме грызунов даже на фоне мозаичности загрязнения биоценоза.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные на полевых животных, сопоставимы с данными лабораторных исследований [16]. Ранее нами были изучены закономерности депонирования ^{90}Sr после его однократного введения половозрелым разновозрастным мышам СВА, развитие которых проходило на фоне влияния экзогенных воздействий, модифицирующих рост и развитие скелета. Эксперимент I — условия нормального (стандартный рацион) и замедленного развития (овсяная монофагия самок с момента рождения у них потомства; после перевода на

самостоятельное питание — этот же рацион для детенышей до конца эксперимента). Эксперимент II: большее количество экзогенных воздействий: овсяная монофагия (см. выше), последующий перевод на стандартный рацион, инъекции препарата, усиливающего костную резорбцию. В обоих экспериментах наблюдается увеличение коэффициента озоления с массой тела (значит, и с возрастом) (0.84, $p < 0.0001$ и 0.67, $p < 0.0001$ соответственно) (рис. 3, а), свидетельствующее об увеличении минеральной фракции костей. Удельная активность ^{90}Sr в костной ткани животных зависит от минеральной плотности кости. Выявлена обратная связь удельной активности ^{90}Sr и коэффициента озоления кости (-0.88 , $p < 0.0001$ и -0.80 , $p < 0.0001$, соответственно) (рис. 3, б).

Несколько различающееся положение кривых на рис. 3, а связано с проведением экспериментов на животных разных сезонов рождения (сезон рождения, а также условия содержания и питания способны изменить темп роста животных). Различия на рис. 3, б обусловлены количеством вводимого радионуклида (2.1 или 3.2 кБк на животное), разным возрастом, в котором животные получали инъекцию ^{90}Sr , а также сроком эвтаназии (1-е или 21-е сут после введения ^{90}Sr). Более высокий уровень аккумуляции ^{90}Sr в условиях эксперимента по сравнению с природной средой объясняется однократным введением относительно большого количества радионуклида.

Полученные в настоящем исследовании, а также ранее полученные данные легко могут быть объяснены с точки зрения физиологии костной ткани. Реактивность кости в первую очередь определяется ее возрастом, с увеличением которого повышается степень минерализации кости. Наличие минеральных компонентов оказывает существенное влияние на прочность фиксации остеотропных веществ. Известно, что молодая (не полностью минерализованная) костная ткань сильнее удерживает на своей поверхности радионуклиды и стабильные элементы, чем полностью минерализованная [6, 11, 12, 30–32]. Молодая кость содержит больше воды, благодаря чему оказывается возможной большая скорость депонирования минерального компонента (под депонированием подразумевается результирующая процессов накопления—выведения). Показано, например, что отношение минерального содержания (зола) старой и вновь образующейся кости редко превышает 1.5 : 1.0, при этом отношение уровня накопления остеотропных радионуклидов, аккумулирующихся в этих структурах, может составлять 1: 10 или даже 1: 20 [12]. В то же время имеются работы, отрицающие зависимость депонирования ^{90}Sr и минеральной плотности кости. Например, в работе [33] у взрослых жителей радиоактивно загрязненных территорий Уральского региона, у которых полностью минерализована

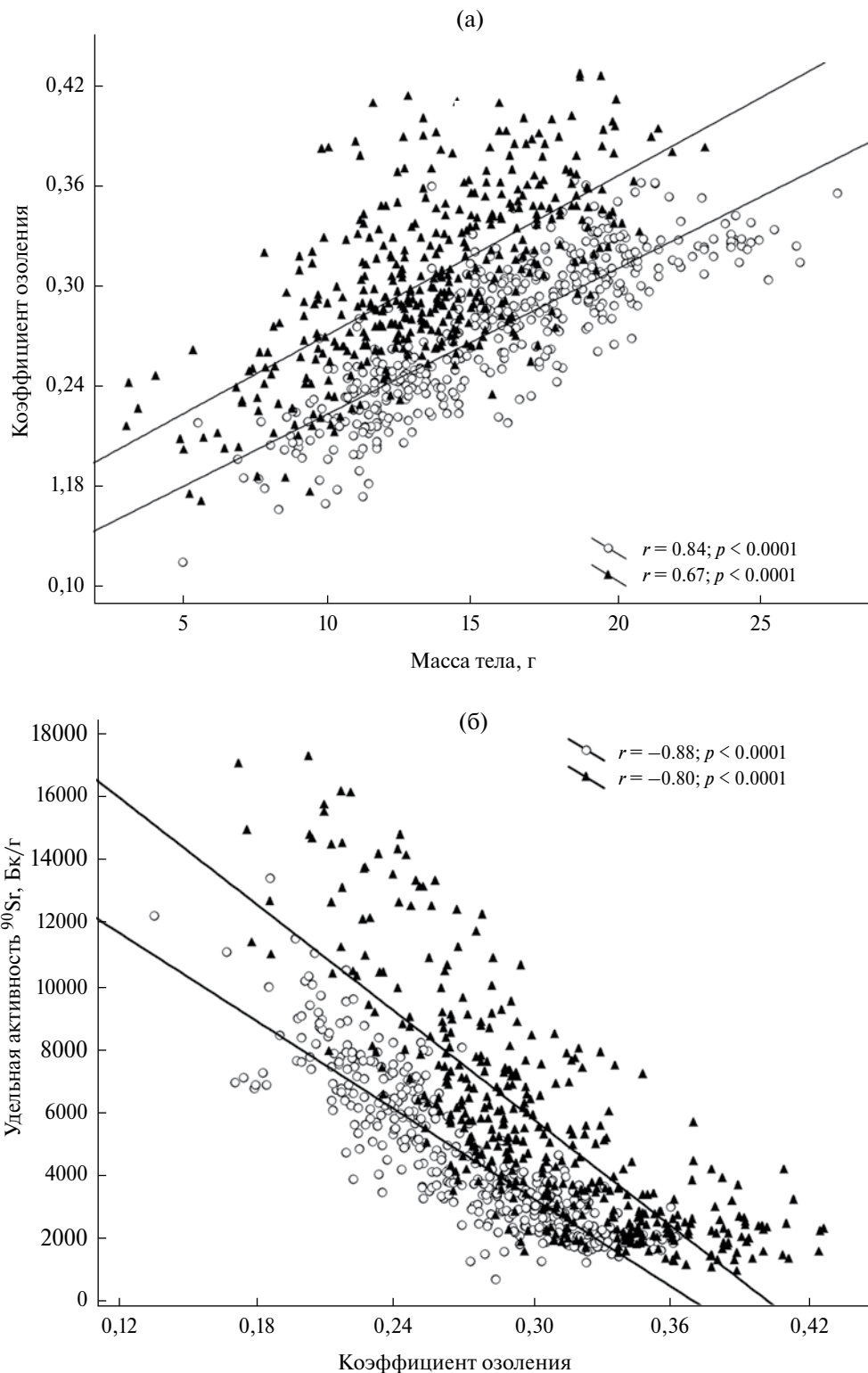


Рис. 3. Зависимость коэффициента озоления кости и массы тела (а) и удельной активности ^{90}Sr и коэффициента озоления (б) в экспериментах на разновозрастных мышях СВА (однократное введение): эксперимент I (светлые кружки) – условия нормального и замедленного развития ($n = 434$); эксперимент II (треугольники) – модификация роста и развития скелета ($n = 404$) [16].

костная ткань на момент поступления радионуклида, не обнаружена связь между содержанием минеральных веществ и удельной активностью ^{90}Sr в кости. Тем не менее в этой работе было описано возрастное увеличение минеральной плотности кости и уровней накопления ^{90}Sr в период роста организма, что хорошо согласуется с нашими представлениями о характере связи минеральной плотности и возраста.

Следует отметить, что в работах разных авторов удельную активность ^{90}Sr приводят в неодинаковых единицах: в расчете на единицу массы золы, единицу массы стабильного кальция (как составной части золы, при этом концентрация Ca^{2+} в золе варьирует незначительно), единицу массы сырой или сухой кости, а также на единицу массы воздушно-сухой массы тушки животного или костно-мышечной ткани. Расчеты на единицу массы золы или стабильного кальция используют в основном в медико-биологических исследованиях, они показывают результаты, сходные с нашими, — уменьшение накопления ^{90}Sr с увеличением массы тела (значит, и с увеличением возраста) [3, 22 и др.]. Снижение накопления ^{90}Sr при увеличении возраста найдено также в костях чернохвостого оленя в Колорадо [34]. Однако авторы связывают этот факт не с увеличением минерализации кости, а с процессами новообразования костной ткани, которые в молодом возрасте протекают более активно.

Удельную активность ^{90}Sr , рассчитанную на единицу массы сырой кости, приводят чаще всего в радиоэкологических работах [7, 20, 35 и др.], и они не всегда демонстрируют возрастную зависимость накопления ^{90}Sr . Авторы многих работ вообще не указывают единицы измерения аккумуляции ^{90}Sr [9, 36 и др.]. Это не только делает невозможным выявление закономерностей накопления ^{90}Sr , но затрудняет даже элементарное сравнение данных, приводимых в разных работах.

Результаты нашего исследования позволяют по-новому взглянуть на описанные в литературе данные по накоплению ^{90}Sr грызунами в природной среде, в частности, на территории ВУРСа. В скелете некоторых особей грызунов фиксируется значительно более высокое накопление ^{90}Sr (до 3–5 раз от среднего значения в выборке) [27, 37]. Учитывая, что механизм депонирования ^{90}Sr в костной ткани позвоночных, независимо от пути и ритма поступления, одинаков, можно предполагать влияние в естественных условиях как экзогенных, так и эндогенных воздействий, модифицирующих уровень депонирования радионуклида. Имеются в виду как перемещение животных из более радиоактивно загрязненных территорий на менее загрязненные, так и морфофизиологические особенности костной ткани этих животных. В последнем случае это индивидуальные различия минерального обмена: вариации гормонального

фона, связанные с полом и возрастом, изменения состояния кости, могущие возникнуть в результате нарушения развития скелета животных, и т.д. Если факт повышенной аккумуляции ^{90}Sr наблюдается у взрослых животных, то их перемещение из более загрязненных в менее загрязненные районы представляется наиболее вероятным объяснением различий в накоплении ^{90}Sr . Для молодых животных предположение о дальних перемещениях кажется маловероятным [38]. В этом случае из экзогенных воздействий могут иметь место некоторые особенности рациона детенышей по сравнению с взрослыми особями. Нельзя исключить, что у некоторых молодых индивидов физиологический возраст костной ткани в силу ряда причин (например, нехватка кормов) может быть значительно моложе хронологического, т.е. кость недообызвествлена. В этом случае факт более интенсивного кумулирования ^{90}Sr в скелете этих животных можно связать с влиянием минеральной плотности. В литературе имеются указания на несовпадение календарного и физиологического возрастов при длительном содержании животных на измененных диетах [39–41]. Результаты наших лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что несбалансированная диета в течение длительного времени не только замедляет темп роста тела, но и препятствует дифференциации морфологических структур скелета, вызывая несоответствие хронологического и физиологического возрастов [16]. В нашей работе показано влияние морфофизиологических особенностей скелета, в частности минеральной плотности кости, на величину депонирования ^{90}Sr у животных в естественных условиях.

Таким образом, изучение аккумуляции ^{90}Sr у двух видов мышевидных грызунов (малая лесная мышь и мышь полевая), обитающих на территории ВУРСа (хроническое поступление ^{90}Sr), показало зависимость уровня накопления радионуклида от минеральной плотности костной ткани.

Полученные результаты свидетельствуют об одинаковости физиологических закономерностей накопления ^{90}Sr , выявленных в лабораторном эксперименте с однократным поступлением радионуклида, и у мышевидных грызунов, обитающих в условиях хронического поступления ^{90}Sr :

- коэффициент озоления увеличивается с увеличением массы животных в процессе их физиологического созревания;
- уровень накопления ^{90}Sr снижается с увеличением коэффициента озоления кости и, соответственно, с увеличением массы тела;
- повышенное накопление ^{90}Sr у отдельных особей в природной среде может быть обусловлено низким уровнем минерализации их костной ткани.

Данные об уровне накопления ^{90}Sr при различной степени минерализации костей скелета могут

представлять также прикладной интерес как указание на относительный возраст исследуемого животного.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭРиЖ РАН, а также частично поддержана Комплексной программой УрО РАН (проект № 18-4-4-9).

Автор выражает благодарность Е.Б. Григоркиной и М.В. Модорову за предоставление костного полевого материала и данных камеральной обработки, Н.М. Любашевскому – за обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стариченко В.И., Любашевский Н.М., Попов Б.В.* Индивидуальная изменчивость метаболизма остеотропных токсических веществ. Екатеринбург: Наука, 1993. 168 с.
2. *Stover B.J.* Metabolism of radioactive isotopes which deposit mainly in the skeleton // *Health Phys.* 1959. V. 1. № 4. P. 373–378.
3. Метаболизм стронция: сборник статей: Пер. с англ. / Под ред. В.А. Книжникова, А.А. Моисеева. М.: Атомиздат, 1971. 344 с.
4. ICRP. Publication 20. Alkaline earth metabolism in adult man. Oxford: Pergamon Press, 1973. 92 p.
5. *Vaughan J.M.* The physiology of bone. Oxford: Clarendon Press, 1981. 265 p.
6. *Любашевский Н.М.* Метаболизм радиоизотопов в скелете позвоночных. М.: Наука, 1980. 255 с.
7. *Ильенко А.И., Крапивко Т.П.* Экология животных в радиационном биогеоценозе. М.: Наука, 1989. 224 с.
8. *Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я. и др.* Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справочное издание. Л.: Химия, 1990. 464 с.
9. *Шведов В.Л., Аклеев А.В.* Радиобиология стронция-90. Челябинск: УНПЦ РМ, 2001. 298 с.
10. *Любашевский Н.М., Попов Б.В., Мокронос А.А. и др.* Биологические основы межвидовых экстраполяций параметров скелетного метаболизма // Пограничные проблемы экологии: Сб. науч. тр. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 84–102.
11. *Ньюман У., Ньюман М.* Минеральный обмен кости. М.: Иностран. лит., 1961. 270 с.
12. *Энгстрем Э., Бьёрнерстед П., Клемендсон К., Нельсон Э.* Кость и радиоактивный стронций: Пер. с англ. М.: Медгиз, 1962. 128 с.
13. Публикация МКРЗ 23. Человек: медико-биологические данные: Докл. рабочей группы комитета II МКРЗ по условному человеку. М.: Медицина, 1977. 496 с.
14. *Свешников А.А., Швед С.И., Смотрова Л.А. и др.* Радионуклидные исследования репаративного костеобразования и его гормональная регуляция при лечении открытых переломов костей голени методом Г.А. Илизарова // Чрескостный компрессионно-дистракционный остеосинтез в травматологии и ортопедии: Сб. науч. тр. Вып. 11. Курган, 1986. С. 14–26.
15. Публикация МКРЗ 89. Основные анатомические и физиологические данные для использования в радиационной безопасности: референтные значения. М.: Медкнига, 2007. 318 с.
16. *Стариченко В.И.* Индивидуальные особенности кинетики остеотропных веществ: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Челябинск: Челяб. госуд. пед. ун-т, 2007.
17. *Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др.* Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа. Екатеринбург: Гощицкий, 2008. 204 с.
18. *Бетенеков Н.Д., Ипатова Е.Г., Баушева О.П., Любашевский Н.М.* Идентификация бета-излучателей биопроб с территории ВУРСА / Проблемы экологии и охраны окружающей среды: Тез. докл. науч.-практ. семинаров на междунар. выставке “Уралэкология-96”. Екатеринбург, 1996. С. 193–194.
19. Атлас Восточно-Уральского и Карачаевского радиоактивных следов, включая прогноз до 2047 года / Под ред. Ю.А. Израэля. М.: ИГКЭ Росгидромета и РАН, Фонд “Инфосфера” – НИА-Природа, 2013. 140 с.
20. *Стариченко В.И., Любашевский Н.М.* Индивидуальные особенности аккумуляции ^{90}Sr в организме двух видов серых полевок, обитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38. Вып. 3. С. 375–383.
21. *Indritz A.N., Hegarty P.V.J.* Problems in the choice of a representative bone for mineral analysis: evidence from five bones of rats at two stages of development // *J. Anat.* 1980. V. 131. № 2. P. 317–320.
22. *Толстых Е.И., Перемышлова Л.М., Шагина Н.Б. и др.* Особенности накопления и выведения ^{90}Sr у жителей Уральского региона в период 1957–1988 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2005. Т. 45. № 4. С. 464–473.
23. *Мина М.В., Клевезаль Г.А.* Рост животных. Анализ на уровне организма. М.: Наука, 1976. 291 с.
24. *Оленев Г.В.* Функционально-онтогенетический подход в изучении популяций цикломорфных млекопитающих: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Екатеринбург: Институт экологии растений и животных УрО РАН, 2004.
25. *Ивантер Э.В.* О сезонно-возрастных изменениях веса тела рыжей полевки (*Clethrionomys glareolus* Schreb.) // Ученые записки Петрозавод. гос. ун-та. 2015. № 4. С. 9–11.
26. *Григоркина Е.Б., Оленев В.Г.* Роль разнокачественности природных популяций цикломорфных млекопитающих в реакциях на радиационное воздействие /

- Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат. V Междунар. конф., г. Томск, 13–16 сентября 2016 г. Томск: STT, 2016. С. 185–189.
27. Тарасов О.В. Радиоэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Озерск, 2000.
 28. Chesser R.K., Sugg D.W., Lomakin M.D. et al. Concentrations and dose rate estimates of ^{134}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr in small mammals at Chernobyl, Ukraine // Environ. Toxicol. Chem. 2000. V. 19. № 2. P. 305–312.
 29. Стариченко В.И., Любашевский Н.М., Модоров М.В., Чибиряк М.В. ^{90}Sr в скелете как метка миграционной активности мышевидных грызунов в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. 2014. № 3. С. 230–240.
 30. Книжников В.А., Марей А.Н. К метаболизму стронция у человека // Метаболизм стронция. М.: Атомиздат, 1971. С. 59–73.
 31. Любашевский Н.М., Шарыгин Л.М., Степина В.И. Нативные поверхности и сорбционная способность зрелой и формирующейся костной ткани // Метаболизм радиоизотопов в животном организме. Свердловск, 1974. С. 12–18.
 32. Расин И.М., Пантелеев Л.И., Саранульцев И.А. и др. Закономерности формирования минеральной части скелета у млекопитающих // Журн. общей биологии. 1981. Т. 42. № 1. С. 118–121.
 33. Толстых Е.И. Половозрастные особенности минерализации скелета у жителей радиоактивно загрязненных территорий Уральского региона: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Челябинск: Челяб. госуд. пед. ун-т, 2006.
 34. Фэррис Г.С., Уиккер Ф.А., Дал А.Х. Влияние возраста на накопление радиоактивного и стабильного стронция в костях чернохвостого оленя // Метаболизм стронция. М.: Атомиздат, 1971. С. 83–95.
 35. Стариченко В.И., Модоров М.В. Распределение β -активности в организме мышевидных грызунов, обитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Вопросы радиационной безопасности: Науч.-практ. журн. ПО “Маяк”. 2013. Спец. вып.: 2013 год – год охраны окружающей среды. С. 66–73.
 36. Сенюк О.Ф., Горовой Л.Ф., Ковалёв В.А. и др. Особенности и возможность химической модификации поведенческих реакций в приподнятом крестообразном лабиринте хронически облученных мышей с различной генетически детерминированной радиочувствительностью // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т. 53. № 2. С. 170–182.
 37. Тарасов О.В., Любашевский Н.М., Стариченко В.И. Экологические факторы как модификаторы фундаментальных закономерностей метаболизма ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ у позвоночных в радиоактивной среде // IV съезд по радиационным исследованиям: (Радиобиология, радиоэкология, радиац. безопасность), Москва, 20–24 нояб. 2001 г.: Тез. докл. Т. 2. М., 2001. С. 614.
 38. Громов В.С. Пространственно-этологическая структура популяций грызунов. М.: КМК, 2008. 581 с.
 39. Пархон К.И. Возрастная биология. Клинические и экспериментальные исследования. Бухарест: Изд-во иностр. лит., 1959. 467 с.
 40. Касавина Б.С., Торбенко В.П. Жизнь костной ткани. М.: Наука, 1979. 176 с.
 41. Гончарова Н.Н., Чижикина Т.П. Влияние морфологических особенностей индивида на скорость возрастных изменений // Проблемы современной морфологии человека: Мат. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 80-летию проф. Б.А. Никитюка (25–27 сент. 2013 года). М., 2013. С. 109–110.

Accumulation of ^{90}Sr in Murine Rodents of the East Ural Radioactive Trace Zone: Influence of Mineral Density of the Bone

V. I. Starichenko *

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia
*E-mail: starichenko@ipae.uran.ru

The accumulation of ^{90}Sr in the bone tissue of two species of murine rodents – striped field mouse (*Apodemus agrarius* Pall., 1771) and pygmy wood mouse (*Sylvaemus uralensis* Pall., 1811), living in the zone of the Eastern Ural Radioactive Trace with a ^{90}Sr contamination density of 0.074–3.7 and 3.7–18.5 MBq/m² (2–100 and 100–500 Ci/km² – the periphery and the epicenter, respectively), has been evaluated. The reverse dependence of the specific activity of ^{90}Sr and the bone mineral density was revealed (the epicenter: small forest mice $r = -0.42$, $p = 0.0001$, field mice – $r = -0.44$, $p < 0.0001$; the periphery: small forest mice – $r = -0.21$, $p = 0.0024$). A comparison was made with the data of laboratory experiments on linear mice with a single administration of ^{90}Sr ($r = -0.80$ – 0.88 , $p < 0.0001$). Possible causes of the increased accumulation of ^{90}Sr in individuals are discussed.

Keywords: East-Ural radioactive trace (EURT), rodents, ^{90}Sr , bone tissue, mineral density of bone tissue