

УДК 539.16.04+599.343.4

ЗАВИСИМОСТЬ ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА КОСТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ МЫШЕВИДНЫХ ГРЫЗУНОВ ОТ УРОВНЯ НАКОПЛЕНИЯ ^{90}Sr В СКЕЛЕТЕ

© 2012 г. В. И. Стариченко*, М. В. Жуковский**

*Институт экологии растений и животных УрО РАН
620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202
e-mail: starichenko@ipae.uran.ru

**Институт промышленной экологии УрО РАН
620990 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 20
e-mail: michael@ecko.uran.ru

Поступила в редакцию 28.07.2011 г.

Исследовали взаимосвязь между накоплением ^{90}Sr в скелете лабораторных мышей после однократного введения радионуклида и создаваемой им дозой на костных поверхностях. Измерения дозы проведены методом термолюминесцентной дозиметрии. Выявлена положительная корреляция между мощностью дозы на поверхностях костей (череп и нижние челюсти) и удельной активностью ^{90}Sr в них. Изучена возможность расчетной оценки инкорпорации ^{90}Sr в костной ткани по дозиметрическим данным, позволяющей сохранить костный материал для дальнейших исследований. Получены коэффициенты перехода от дозы на костных поверхностях к удельной активности ^{90}Sr в костях. Однако численные значения коэффициентов требуют уточнения для условий хронического поступления ^{90}Sr , а также в зависимости от анатомии костей, видовых и экологических особенностей животных.

Ключевые слова: ^{90}Sr , костная ткань, мышцы линии СВА, радиометрия, термолюминесцентная дозиметрия, костные поверхности.

Определение дозовой нагрузки от инкорпорированного ^{90}Sr — ключевой вопрос оценки жизнеспособности природных популяций на радиоактивно загрязненных территориях, включая Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Здесь ^{90}Sr , депонированный в костной ткани, является главным дозообразующим радионуклидом. В скелете две мишени β -облучения ^{90}Sr и его дочерним ^{90}Y : красный костный мозг (КМ) и костные поверхности (КП), высланные остеогенными клетками и соединительнотканью клеточными элементами. Наиболее опасным эффектом облучения КМ является лейкоз, костей — остеосаркома, обычно развивающаяся из клеток КП. У мелких млекопитающих доза внутреннего облучения КМ практически равна дозе на кость (Шишкина, 1998; Шведов, Аклеев, 2001). Оценка дозы на КП представляет собой отдельную проблему.

Для разработки подходов к ее решению на первых этапах в модельном эксперименте на лабораторных мышцах была исследована взаимосвязь между накоплением ^{90}Sr в скелете и создаваемой им дозой на КП. Изучена также возможность расчетной оценки инкорпорации ^{90}Sr в костной ткани по дозиметрическим данным. Такой подход позво-

лит исключить неизбежное при рутинном определении удельной активности радионуклида разрушение биологического материала, который в ряде случаев является уникальным (например, коллекция черепов мелких млекопитающих с территории ВУРСа в ИЭРиЖ УрО РАН). Измерения дозы проведены методом термолюминесцентной (ТЛ) дозиметрии. Этот метод апробирован для ретроспективной оценки дозы внутреннего облучения *in vivo* в дозиметрических и радиоэкологических исследованиях (Шишкина, 1998; Шишкина, Токарева, 2010), а также для верификации и уточнения моделей метаболизма остеотропных радионуклидов в организме (Lyubashevsky et al., 1996). Однако в указанных работах он использован для изучения механизмов формирования дозы преимущественно в зубных тканях.

Наш эксперимент проведен на половозрелых мышцах линии СВА ($n = 29$) с массой тела 32.5 ± 0.6 г. Животным однократно внутрибрюшинно был введен ^{90}Sr (в виде раствора соли хлористого стронция) в дозе 7.5 кБк на животное. Такое количество ^{90}Sr приводит к формированию удельной активности радионуклида в костной ткани экспериментальных мышей, сопоставимой с

уровнем депонирования ^{90}Sr у животных из эпицентра ВУРСа (Стариченко, 2004). Хроническое поступление радионуклида в организм животных, имеющее место в природной среде, в условиях лабораторного эксперимента имеет ряд методических ограничений, вследствие чего трудноосуществимо.

Эвтаназию осуществляли через 5 и 14 сут после введения ^{90}Sr . Поглощенные дозы на поверхностях тщательно очищенных от мягких тканей и высохших костей (череп и нижние челюсти) измеряли с помощью высокочувствительных детекторов ТЛД-500К (в иностранной литературе $\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{C}$) и регистрирующей аппаратуры, разработанных в УГТУ-УПИ. Детекторы имели форму цилиндров диаметром 5 мм и высотой 1 мм. Этот метод подробно описан в работе Е.А. Шишкиной (1998). Измерения на черепе проводили в двух положениях детектора, на челюсти – в одном (рис. 1). Время экспонирования – 7 сут. По истечении времени детекторы снимали, измеряли накопленные ими дозы D (мГр) и рассчитывали мощность доз DR (мГр/сут).

При этом необходимо учитывать, что используемые ТЛ детекторы не предназначены для прямого измерения доз β -излучения, так как отклик детектора из-за значительного поглощения в нем β -излучения будет пропорционален дозе, усредненной по объему детектора. Так как точная калибровка дозиметра по β -источникам представляет значительную сложность, регистрируемую величину следует, скорее, рассматривать как относительный параметр, пропорциональный удельной активности ^{90}Sr в костной ткани, а не как реальное значение мощности дозы на поверхности кости.

Радиометрию проб осуществляли по апробированным методикам (Стариченко, 2007). Для описания данных использовали среднее значение, стандартное отклонение, относительное стандартное отклонение, ошибку среднего и относительную ошибку среднего. Для установления меры зависимости между изучаемыми показате-

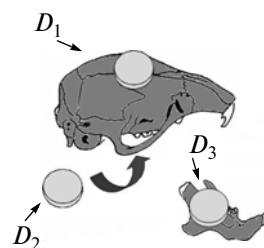


Рис. 1. Расположение ТЛ детекторов при экспонировании на черепе и нижней челюсти.

лями проводили регрессионный и корреляционный анализ с помощью компьютерного пакета лицензионных программ Microsoft Excel 2002 и Statistica 6.0 (StatSoft Inc.).

Неравномерность распределения ^{90}Sr и создаваемых им мощностей доз на КП, а также уменьшение с течением времени его удельной активности (табл. 1) хорошо согласуются с литературными данными (Энгстрем и др., 1962; Метаболизм стронция, 1971; Баженов и др., 1990; Журавлев, 1990; Шведов, Аклеев, 2001; Stover, 1959; ICRP Publication..., 1973, 1995; Lloyd et al., 1976).

Выявлена положительная корреляция между мощностью дозы на поверхности костей и удельной активностью ^{90}Sr в них (рис. 2). При этом использование для черепа мощности дозы по измерениям в двух геометриях резко повышает значимость корреляции ($r = 0.33-0.36$, $p = 0.088-0.115$ и $r = 0.31$, $p = 0.032$ соответственно). Последнее можно объяснить как увеличением объема выборки, так и неравномерностью распределения ^{90}Sr по объему кости, связанной с различиями удельной поверхности кости (Стариченко, 2007). При этом неравномерность удельной поверхности сильнее выражена для различных участков черепа, чем для нижней челюсти. Так, например, в дорсальной области черепа, представляющей собой плоские кости, между которыми имеются отдельные спиккулы, удельная поверхность (и соответственно удельная активность ^{90}Sr) значитель-

Таблица 1. Удельная активность ^{90}Sr (C_{Sr}) и мощность дозы (DR) на поверхностях костей ($M \pm m$)

Участок скелета	C_{Sr} , Бк/г		DR , мГр/сут	
	Время после введения ^{90}Sr , сут			
	5 ($n = 5$)	14 ($n = 24$)	5 ($n = 5$)	14 ($n = 24$)
Череп	855 ± 49 (774–1045)	652 ± 21 (385–823)	$0.263 \pm 0.058^{**}$ (0.074–0.385)	0.282 ± 0.014 (0.144–0.584)
Нижняя челюсть*	1904 ± 155 (1400–2659)	1730 ± 48 (1206–2499)	0.322 ± 0.040 (0.216–0.495)	0.472 ± 0.019 (0.242–0.800)

* Число наблюдений равно $2n$ (взяты обе кости – 47).

** Измерения в одной геометрии (DR_1).

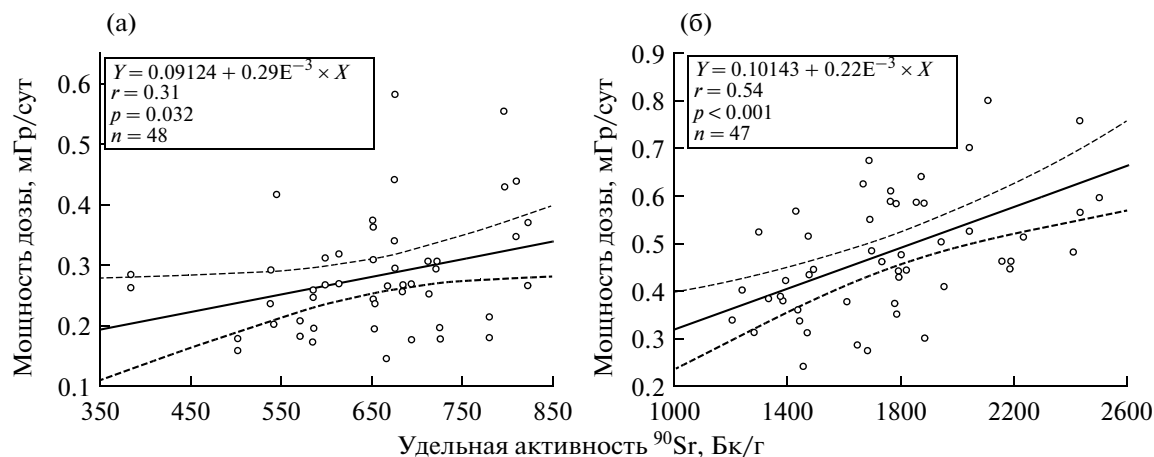


Рис. 2. Мощность дозы на поверхности кости в зависимости от удельной активности ^{90}Sr (группа “14 сут”): а – череп, б – нижняя челюсть; пунктирные линии – границы 95%-ного доверительного интервала.

но меньше, чем в костях вентрального отдела, имеющих более развитую трабекулярную ткань.

Для исследования возможности использования данных дозиметрии при верификации уровня депонирования ^{90}Sr в отдельных костях без их предварительного разрушения группа “14 сут” методом случайной выборки была разделена на две подгруппы (табл. 2). Для подгруппы “14 сут-1” получены пересчетные коэффициенты (k) между мощностью дозы и удельной активностью ^{90}Sr , а также оценены пределы их изменчивости (табл. 3).

Следует отметить, что экспериментально обнаруженное значение k достаточно близко к значению, которое было оценено расчетным методом с использованием программы VARSKIN 3 (Durham, 2006), изначально предназначенной для оценки дозы β -излучения на кожные покровы. Источник излучения был смоделирован в виде диска диаметром 1.5 см, толщиной 0.5 мм и плотностью 1.8 г/см³ (плотность кортикальной кости). Удельная активность ^{90}Sr (в равновесии с ^{90}Y) была задана равной 1000 Бк/г. Для поглотителя с плотностью 3.9 г/см³ (плотность Al_2O_3) были рассчита-

ны значения мощности дозы β -излучения за поглотителем при изменении его толщины от 0 до 1 мм (с шагом 0.1 мм). В результате было получено расчетное значение мощности дозы β -излучения, усредненной по толщине детектора. Данная величина составила 0.949 (мкГр/сут)/(Бк/г), что в целом хорошо согласуется с полученной в ходе эксперимента величиной 0.468 (мкГр/сут)/(Бк/г) при измерениях на черепе. Наблюдаемое различие может быть обусловлено несоответствием экспериментальной и расчетной геометрии облучения, сложностью калибровки детекторов по β -излучению и приближениями, используемыми при расчете доз в программе VARSKIN 3.

Верификация данных радиометрии костной ткани животных группы “5 сут” и подгруппы “14 сут-2” и данных, полученных расчетным путем, показала их удовлетворительное совпадение (табл. 4). При этом использование коэффициента, полученного на выборке животных аналогичного срока выведения радионуклида, повышает величину совпадения. Например, пересчетный коэффициент, полученный на животных под-

Таблица 2. Удельная активность ^{90}Sr (C_{Sr}) и мощность дозы (DR) на поверхностях костей в подгруппах животных “14 сут” ($M \pm m$)

Участок скелета	Подгруппа			
	“14 сут-1” ($n = 12$)		“14 сут-2” ($n = 12$)	
	C_{Sr} , Бк/г	DR , мГр/сут	C_{Sr} , Бк/г	DR , мГр/сут
Череп DR_1		0.264 ± 0.025		0.227 ± 0.016
DR_2	640 ± 18	0.341 ± 0.030	665 ± 24	0.296 ± 0.030
DR_{1+2}		0.303 ± 0.021		0.261 ± 0.018
Нижняя челюсть*	1656 ± 50	0.448 ± 0.022	1807 ± 80	0.496 ± 0.030

* Число наблюдений равно $2n$ (взяты обе кости – 47).

Таблица 3. Численные значения пересчетных коэффициентов (k) в подгруппе “14 сут-1”, (мкГр/сут)/(Бк/г)

Участок скелета	Отношение	Среднее	Стандартное отклонение	Стандартная ошибка	Относительное стандартное отклонение	Относительная стандартная ошибка
Череп	DR_1/C_{Sr}	0.407	0.092	0.026	0.226	0.064
	DR_2/C_{Sr}	0.529	0.128	0.037	0.242	0.070
	DR_{1+2}/C_{Sr}	0.468	0.125	0.026	0.267	0.056
Нижняя челюсть	DR_3/C_{Sr}	0.272	0.059	0.012	0.217	0.044

Таблица 4. Удельная активность ^{90}Sr (C_{Sr}) в костях, определенная расчетным методом (А), в сравнении с результатами радиометрии (Б) ($M \pm m$)

Кость	Точка расположения ТЛД	DR , мГр/сут	k для подгруппы “14 сут-1”, (мкГр/сут)/(Бк/г)	C_{Sr} , Бк/г			
				Группа “5 сут”		Подгруппа “14 сут-2”	
				А	Б	А	Б
Череп	DR_1	0.263 ± 0.058	0.407 ± 0.026	646 ± 184	855 ± 49	558 ± 75	665 ± 24
		0.227 ± 0.016					
	DR_2	—	0.529 ± 0.037	—		560 ± 96	
		0.296 ± 0.030					
DR_{1+2}	—	0.468 ± 0.026	—	558 ± 69			
	-0.261 ± 0.018						
Нижняя челюсть	DR_3	0.322 ± 0.040	0.272 ± 0.012	1184 ± 199	1904 ± 155	1824 ± 191	1807 ± 80
		0.496 ± 0.030					

группы “14 сут-1”, позволяет оценить удельную активность ^{90}Sr в костях животных группы “5 сут” с ошибкой 25–40%, у животных подгруппы “14 сут-2” – 15–20%.

Сравнение мощностей доз на КП и КМ (расчет по формулам, приведенным в опубликованных работах (Шибкова, 2000; Шишкина, Любашевский, 2008), с использованием радиометрических данных), показало, что дозовая нагрузка на КП во много раз меньше, чем на КМ. В противоположность этому в когорте людей, скелет которых депонировал ^{90}Sr в течение нескольких десятилетий, дозы на КП выше доз на КМ (ICRP, 1996). Видовые различия в формировании дозы в значительной степени связаны с особенностями размеров и геометрии костей.

Таким образом, выявлена положительная корреляция между удельной активностью ^{90}Sr в костях и мощностью дозы на их поверхностях, которая свидетельствует о принципиальной возможности использования неразрушающей методики для оценки аккумуляции ^{90}Sr в скелете животных. Численные значения коэффициентов, связывающих значения активности ^{90}Sr в скелете с мощностью дозы на органы и ткани, могут быть получены расчетным путем при соответствующем моделировании геометрии и взаимного расположения

органа-источника и органа-мишени. При использовании ультратонких (с массовой толщиной 10–20 мг/см²) детекторов возможно проведение натуральных экспериментов при достаточной активности ^{90}Sr в скелете.

При этом численные значения коэффициентов требуют уточнения для условий хронического поступления ^{90}Sr , а также в зависимости от анатомии костей, видовых и экологических особенностей животных. Такие пересчетные коэффициенты (при наличии данных об удельной активности ^{90}Sr) могут быть использованы для оценки структуры заболеваемости и смертности мелких млекопитающих на радиоактивно загрязненных территориях, тем более что возможно повышение частоты опухолей скелетных тканей облучаемых популяций, которая, как известно, возрастает при высоких уровнях радиоактивного загрязнения среды обитания.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного проекта УрО РАН (№ 09-М-24-2001).

Авторы выражают благодарность И.И. Мильману за помощь в проведении ТЛ измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.Я.* и др. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справ. изд. Л.: Химия, 1990. 464 с.
- Журавлев В.Ф.* Токсикология радиоактивных веществ. М.: Энергоатомиздат, 1990. 336 с.
- Метаболизм стронция. Пер. с англ. / Под ред. Книжникова В.А., Моисеева А.А. М.: Атомиздат, 1971. 344 с.
- Стариченко В.И.* Стронций-90 в костной ткани мелких млекопитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат-лы II междунар. конф. Томск, 2004. С. 576–579.
- Стариченко В.И.* Индивидуальные особенности кинетики остеотропных веществ: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. Челябинск, 2007. 50 с.
- Шведов В.Л., Аклеев А.В.* Радиобиология стронция-90. Челябинск: УНПЦ РМ, 2001. 298 с.
- Шибкова Д.З.* Состояние системы гемоиммунопоза экспериментальных животных при хроническом радиационном воздействии в диапазоне малых и промежуточных мощностей доз: Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М., 2000. 41 с.
- Шишкина Е.А.* Опыт реконструкции индивидуальных поглощенных доз млекопитающих при радиоэкологических исследованиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1998. 25 с.
- Шишкина Е.А., Любашевский Н.М.* К вопросу о дозиметрии внутреннего облучения изотопами ^{90}Sr и ^{90}Y для мышевидных грызунов // Адаптация биологических систем к естественным и экстремальным факторам среды: Мат-лы II междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2008. Т. 1. С. 25–30.
- Шишкина Е.А., Токарева Е.Э.* Измерение концентрации ^{90}Sr в зубных тканях методом пассивного ТЛ детектирования // Анри. 2010. № 1. С. 17–27.
- Энгстрем Э., Бьёрнерстед П., Клемендсон К., Нельсон Э.* Кость и радиоактивный стронций. Пер. с англ. М.: Медгиз, 1962. 128 с.
- ICRP Publication 20. Alkaline earth metabolism in adult man. Oxford: Pergamon Press, 1973. 92 p.
- ICRP Publication 70. Basic anatomical and physiological data for use in radiological protection: the skeleton. Oxford: Pergamon Press, 1995. 81 p.
- ICRP Publication 72. Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides: Part 5: Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients // Ann. ICRP. 1996. V. 26 (1). 94 p.
- Lloyd R.D., Mays C.W., Atherton D.R.* et al. Retention and skeletal dosimetry of injected ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{90}Sr in beagles // Radiat. Res. 1976. V. 66. P. 274–287.
- Lyubashevsky N., Starichenko V., Golubev A., Shishkina E.* The theory of individual variability of osteotropic radionuclides metabolism // IRPA-9: 1996 Intern. Congr. on Radiation Protection. Vienna, Austria: Proc. Vienna, 1996. V. 3. P. 128–130.
- Stover B.J.* Metabolism of radioactive isotopes which deposit mainly in the skeleton // Health Phys. 1959. V. 1. № 4. P. 373–378.
- Durham J.S.* VARSKIN 3 [Electronic resource]: a computer code for assessing skin dose from skin dose contamination /Office of Nuclear Regulatory Res., U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, DC: Division of Fuel, Engineering and Radiological Res., 2006. URL: <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6918/cr6918.pdf>