

Неразрушающие методы оценки содержания ^{90}Sr в костях мышевидных грызунов, обитающих на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа

Современная концепция радиационной безопасности, поддержанная МКРЗ, предусматривает защиту от облучения не только человека, но и других видов живых организмов. Практическая реализация этого подхода требует решения ряда радиологических задач, в частности, касающихся радиометрии и дозиметрии.

Ключевые слова: Восточно-Уральский радиоактивный след, ^{90}Sr , грызуны, костная ткань, радиометрия, термолюминесцентная дозиметрия.

Г.П.Малиновский, М.В.Жуковский (Институт промышленной экологии УрО РАН, Екатеринбург); В.И.Стариченко, М.В.Модоров (Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург)

До начала 2000-х гг. в радиационной безопасности доминировал антропоцентрический подход к защите биоты от действия ионизирующих излучений, сформулированный в 1970-80-х гг. Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ), кратко гласящий, что обеспечение дозовых пределов облучения, установленных для человека, является достаточной гарантией защиты других биологических видов (биоты). В последние годы, однако, по мере накопления информации о действии ионизирующих излучений на живые организмы, возрастающую поддержку среди специалистов получает представление о необходимости разработки специальных мер по обеспече-

нию радиационной безопасности биоты [1]. Такое усиление экоцентризма связано с постановкой вопроса глобального значения – адекватности экологического антропоцентризма в предотвращении планетарных изменений в биосфере под давлением техногенеза.

В связи с этим в радиоэкологии возникает ряд новых задач, в том числе разработка соответствующей системы нормирования облучения биоты, определение критериев радиационного ущерба для биоты, сбор данных по зависимости «доза–эффект» для различных представителей биоты. К актуальным задачам следует также отнести разработку надежных и эффективных методов измерения радиационного воздействия

на животных, обитающих на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Данная работа посвящена сравнительному изучению прямых и косвенных методов оценки депонирования ^{90}Sr в костях мелких млекопитающих с территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа).

В настоящее время территория ВУРСа в пределах 5–20 км от ПО Маяк загрязнена преимущественно ^{90}Sr (95,7 %) в результате аварийных выпадений 1957 г., дополнительный вклад в загрязнение вносит ^{137}Cs , удельная активность которого в почвах до 20 раз меньше, чем ^{90}Sr . [2]. При оценке облучения животных, обитающих на территории ВУРСа, в первую очередь рассматривается

поступление ^{90}Sr . Это связано с тем, что ^{90}Sr проявляет ярко выраженную остеотропность, надолго и прочно задерживаясь в костной ткани, и его удельная активность в скелете может рассматриваться как характеристика радиационного воздействия.

Для определения активности ^{90}Sr в образце чаще всего используют радиометрический или радиохимический методы, они считаются весьма точными, но требуют разрушения исследуемого материала. Однако в некоторых случаях потеря биологического материала нежелательна. Например, в Институте экологии растений и животных УрО РАН собрана большая коллекция черепов мелких млекопитающих с территории ВУРСа и сопредельных территорий, и неразрушающий анализ этого материала открыл бы новые возможности для его изучения. Таким образом, является актуальной разработка метода оценки уровня содержания ^{90}Sr в костях полевых животных.

Ранее проведен лабораторный эксперимент на линейных мышках СВА, которым ^{90}Sr вводили однократно внутрибрюшинно [3]. Результаты работы выявили положительную корреляционную зависимость между мощностью дозы на поверхности костей и удельной активностью в них ^{90}Sr . Был сделан вывод, что ТЛ-дозиметрия костных поверхностей может быть использована для оценки удельной активности ^{90}Sr . Близкая задача была решена в работе [4], в которой с применением ТЛ-дозиметрии проводили оценку удельной активности ^{90}Sr в дентине и эмали зубов.

Материалы и методы. В настоящей работе использовали костную ткань животных, отловленных в сентябре 2009 г. на территории ВУРСа с начальной (на

1957 г.) плотностью поверхностного загрязнения ^{90}Sr 0,74–18,5 МБк/м² [5]. Проанализировано 6 видов мелких млекопитающих, а именно:

Apodemus uralensis – малая лесная мышь (n = 6);

Apodemus agrarius – полевая мышь (n = 2);

Myodes (Clethrionomys) rutilus – красная полевка (n = 5);

Microtus oeconomus – полевка-экономка (n = 4);

Microtus arvalis s.l. – обыкновенная полевка (n = 2).

Microtus agrestis – темная полевка (n = 1).

Масса тела животных варьировала от 8,9 до 35,8 г. У животных вычленили череп и нижние челюсти. Кости тщательно очищали от мягких тканей, взвешивали и подвергали воздушной сушке при комнатной температуре. Масса черепов составляла 0,31–0,85 г, челюстей 0,03–0,17 г. Целостные кости использовали для проведения радиационных измерений неразрушающими методами. После чего кости озоляли и проводили бета-радиометрию проб золы для определения удельной активности ^{90}Sr в них.

Ранее радиохимическим методом было показано, что бета-активность скелета обитающих на ВУРСе животных на 90–95 % обусловлена ^{90}Sr + ^{90}Y [6]. Поэтому мы считаем, что правомерно отождествлять величину бета-активности скелета и содержание в нем этих радионуклидов и для простоты изложения употреблять словосочетание «активность ^{90}Sr », подразумевая под ней суммарную бета-активность скелета, обусловленную ^{90}Sr + ^{90}Y .

Для измерения бета-активности костей применяли ТЛ-дозиметрию и радиометрию целостной кости. При использовании этих методов измерения необходимо учитывать эффект самопоглоще-

ния, при этом результат измерений зависит от геометрии и распределения радионуклида между поверхностью и объемом кости. Это обуславливает необходимость применения коэффициентов конверсии для перехода от измеренного сигнала к величине активности образца.

Для ТЛ-дозиметрии в работе использовали Al_2O_3 ТЛ-детекторы типа ТЛД-500К, изготовленные на основе номинально чистого, монокристаллического анионодефектного корунда по технологии, разработанной на Физико-техническом факультете УрФУ [7]. Детекторы имеют форму цилиндра диаметром 5 мм и высотой 1 мм.

ТЛ-детекторы накладывали на теменную область черепов и на нижние челюсти. Время экспонирования составляло 18 суток. По истечении данного времени детекторы снимали и измеряли накопленные ими дозы. Так как ТЛ-детекторы чувствительны к свету, то их размещение на исследуемых объектах проводили при малой освещенности, в отсутствии прямых источников света. Помимо измерений на полевых животных, детекторы в качестве контроля устанавливали на черепа и челюсти «чистых» лабораторных мышей, в рационе которых отсутствовал ^{90}Sr . Измерения накопленных детекторами доз производили на установке ДТУ-01 в Институте промышленной экологии УрО РАН.

Измерения проводили при следующих параметрах:

– диапазон температур нагрева: 298–623 К.

– скорость нагрева – 4 К/с.

Для оценки чувствительности детекторов использовали эталонный источник бета-излучения. Пересчетный коэффициент рассчитывали как отношение показаний прибора к величине, накопленной от эталонного источника

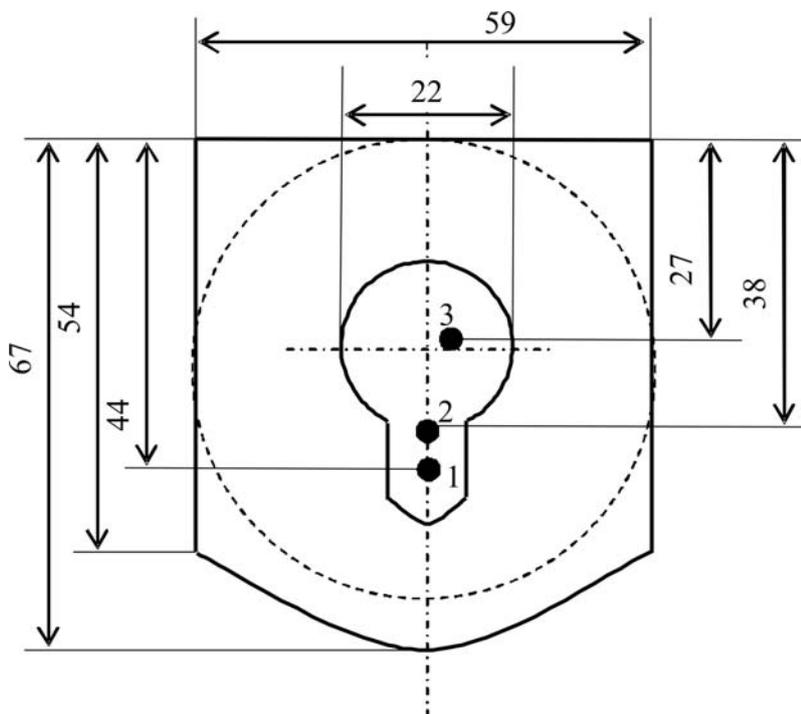


Рис. 1. Схема подложки для неразрушающей радиометрии. 1 – точка фиксации черепа; 2, 3 – точки фиксации челюсти. Пунктиром показано расположение входного окна детектора. Размеры - мм.

дозы. Отклик ТЛ-детектора пропорционален усредненной по объему детектора поглощенной дозе. Поэтому рассчитанная чувствительность и вычисляемое значение мощности дозы следует скорее рассматривать как относительные параметры, пропорциональные удельной активности ^{90}Sr в костной ткани.

Мощности доз, полученные на контрольных животных, не превышали фоновых значений.

Бета-радиометрию целостной кости проводили с помощью прибора БДПБ-01, который является одним из блоков дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М. В БДПБ-01 использован высокочувствительный пластиковый сцинтилляционный детектор диаметром 60 мм и фотоэлектронный умножитель. Для снижения уровня фона при измерении блок детектирования и образец помещали в свинцовый домик.

Череп размещали вдоль про-

дольной оси подложки теменной стороной вверх, верхние резцы фиксировали на подложке в точке 1 (рис.1). Подложку с черепом устанавливали на расстоянии 17 мм от входного окна детектора. Нижние челюсти располагали на подложке и фиксировали в двух точках: между мышечковым отростком и углом нижней челюсти и за нижний резец (рис.1, точки 2 и 3). Подложку с челюстью помещали на расстоянии 9 мм от входного окна детектора. Измерение каждого образца длилось 50 мин. для набора достаточного количества импульсов.

Перед измерениями исследовали влияние позиционирования образца на подложке. Для этого один и тот же образец 10 раз устанавливали на подложку и подвергали измерению. Полученные значения проверяли по критерию Пирсона. Получено, что разброс результатов определяется только статистической природой радио-

активного распада.

После исследования костного материала неразрушающими методами проведены измерения удельной активности ^{90}Sr в тех же образцах с подготовкой проб, включавшей озолнение костей. Радиометрия подобных проб является рутинным методом измерения бета-активности и требует длительной и трудоемкой их подготовки [8]. Кости в фарфоровых лодочках озолняют в муфельной печи в течение 5 часов при температуре 600 °С. После чего взвешивают, помещают на металлические подложки и заливают концентрированной азотной кислотой (череп – 0,6 мл; челюсти – 0,2 мл), добиваясь равномерного распределения раствора путем длительного покачивания подложки между браншами пинцета. После растворения золы подложки помещают под лампу накаливания до полного высыхания проб. Подготовленный для радиометрии образец представляет собой источник, в котором ^{90}Sr относительно равномерно распределен по объему пробы.

Радиометрию проб осуществляли на приборе «RFT 10 MHz-Zahler VAG-120». Время экспонирования каждого образца составляло 20–40 минут (в зависимости от активности пробы). Для расчета абсолютной величины удельной активности (Бк/г сырой кости) градуировку прибора выполняли по серии калийных эталонов [9].

Результаты и обсуждение. По результатам измерения 20 образцов средняя удельная активность ^{90}Sr в черепе, правой и левой челюсти составляет 71, 152 и 153 Бк/г соответственно, диапазон значений – 2–276, 1–549 и 1–597 Бк/г соответственно.

На рис.2 результаты измерения мощности дозы методом

ТЛ-дозиметрии (графики а–в) и скорость счета бета-частиц методом радиометрии целостной кости, отнесенные к массе кости (графики г–е), представлены в соответствии с удельной активностью образцов. Графики, построенные таким образом, демонстрируют возможность обратного перехода от измеряемой величины к удельной активности ⁹⁰Sr в образце. Из рис.2 видно, что зависимость между удельной активностью ⁹⁰Sr и результатами измерения целостной кости может быть описана функциональным соотношением. То есть измеренной величине мощности дозы или плотности потока бета-частиц может быть поставлено в соответствие некоторое значение удельной активности ⁹⁰Sr.

Значения коэффициентов конверсии (*K*), связывающие результаты измерений, полученные неразрушающими методами, и удельную активность образца рассчитывали по формуле:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{D_i}, \quad (1)$$

где *N* = 20 – число образцов; *A_i* – удельная активность образца, Бк/г; *D_i* – скорость счета бета-частиц, имп/(сек·г), либо мощность дозы, мкГр/сут.

Кроме того, рассчитаны параметры линейной и степенной зависимостей между удельной активностью ⁹⁰Sr и результатами измерений целостной кости.

Результаты анализа данных представлены в табл.1 и 2. Для всех зависимостей коэффициент детерминации больше 0,9.

Как видно из табл.1, в случае применения радиометрии целостной кости для обеих нижних челюстей показатель степени (*E*) статистически значимо меньше единицы, т.е. отклонение зависимости от линейной является существенным. Для черепа показате-

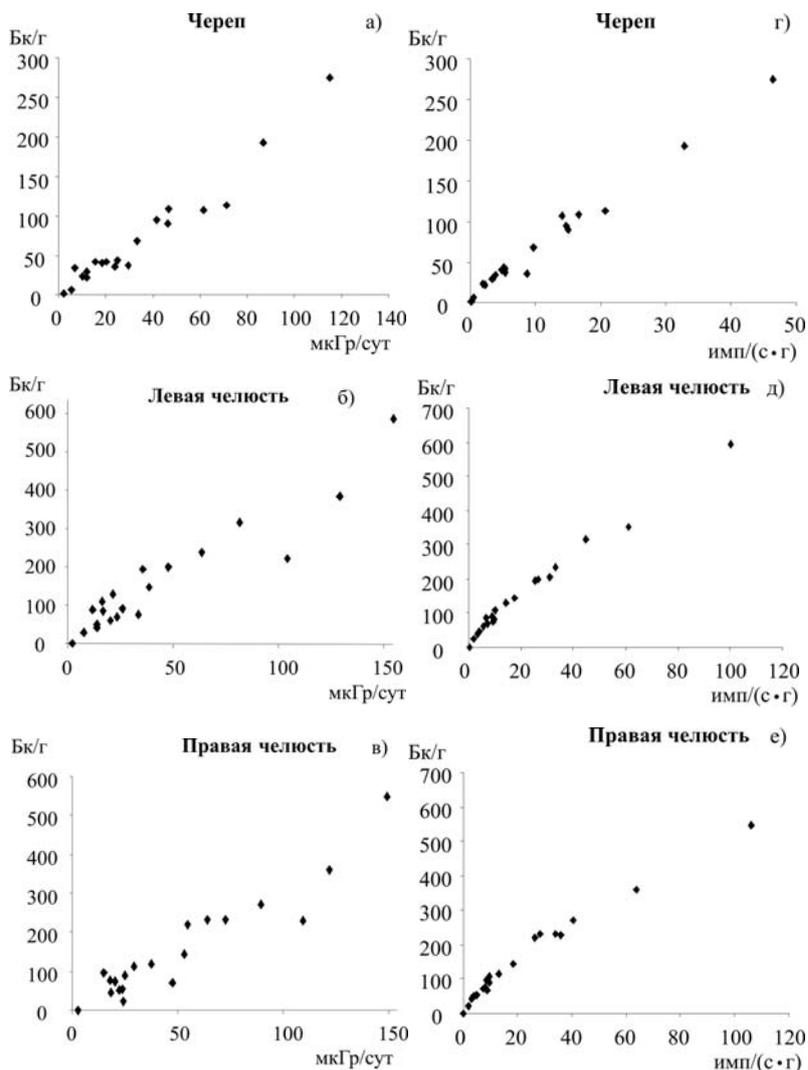


Рис.2. Результаты измерения мощности дозы методом ТЛ-дозиметрии (а–в) и скорости счета бета-частиц методом радиометрии целостной кости, отнесенные к массе кости (г–е), в соответствии с удельной активностью ⁹⁰Sr образцов.

тель степени статистически не отличается от единицы и зависимость можно считать линейной. Свободный член (*B, F*) значимо отличается от нуля в линейных моделях и не отличается в степенных, вследствие этого коэффициент конверсии (*K*) заметно выше параметра *A* линейной зависимости.

В случае ТЛ-дозиметрии (табл.2) свободный член линейной зависимости может быть принят равным нулю и для черепа, и для челюстей. В данном случае рассчитанные значения коэф-

фициента конверсии соответствуют значению параметра *A* линейной зависимости. С учетом того, что для обеих нижних челюстей показатель степени статистически не отличается от единицы, зависимость можно считать линейной. В то же время, для черепа показатель степенной зависимости *E* статистически значимо больше единицы.

Таким образом, сравнение прямых и косвенных методов оценки депонирования ⁹⁰Sr в костной ткани мышевидных грызунов показало следующее.

Табл. 1. Результаты анализа зависимости между удельной активностью ^{90}Sr и скоростью счета бета-частиц, нормированной на массу образца (коэффициент конверсии, параметры линейной и степенной зависимостей с 95 % доверительными интервалами).

Измеряемый образец	K, (Бк/г)/(имп/(сек·г))	Линейная зависимость $Y = A \cdot X + B$		Степенная зависимость $Y = D \cdot X^E + F$		
		A, (Бк/г)/(имп/(сек·г))	B, Бк/г	D, (Бк/г)/(имп/(сек·г))	E	F, Бк/г
Череп	8,1±1,3	5,7±0,4	8,8±5,8	6,2±3,2	0,98±0,13	8±10
Левая челюсть	9,0±1,2	5,7±0,4	33±11	12±5,2	0,84±0,09	10±18
Правая челюсть	9,0±1,1	5,1±0,4	42±15	20±7,2	0,71±0,08	-4±19

Табл. 2. Результаты анализа зависимости удельной активности ^{90}Sr и ТЛ-дозиметрии целостной кости (коэффициент конверсии, параметры линейной и степенной зависимостей с 95 % доверительными интервалами).

Измеряемый образец	K, (Бк/г)/(мкГр/сут)	Линейная зависимость $Y = A \cdot X + B$		Степенная зависимость $Y = D \cdot X^E + F$		
		A, (Бк/г)/(мкГр/сут)	B, Бк/г	D, (Бк/г)/(мкГр/сут)	E	F, Бк/г
Череп	2,1±0,4	2,2±0,3	-4±12	0,35±0,52	1,4±0,3	15±14
Левая челюсть	3,3±0,6	2,9±0,6	13±38	1,2±4,7	1,7±0,7	31±73
Правая челюсть	3,0±0,6	3,1±0,6	-4±34	0,6±1,8	1,3±0,6	31±57

Коэффициенты конверсии (табл. 1 и 2), полученные с помощью ТЛ-дозиметрии или бета-радиометрии целостной кости, могут быть использованы для расчета удельной активности ^{90}Sr в черепе и нижней челюсти животных, отловленных на территории ВУРСа. Однако следует принять во внимание возможную нелинейность зависимости между измерениями бета-радиометрии целостной кости и удельной активностью ^{90}Sr , в этом случае более точные результаты могут быть получены с использованием параметров степенной зависимости, представленных в табл. 1.

Погрешность оценки удельной активности ^{90}Sr неразрушающими методами в основном определяется погрешностью методов измерений (ТЛ-дозиметрии и бета-радиометрии). Полученные метрологические характеристики относятся к диапазону удельной активности ^{90}Sr 2–276 и 1–597 Бк/г для черепа и челюстей соответственно.

По сравнению с традиционным методом определения удельной активности ^{90}Sr на основе радиометрии проб золы преимуще-

ствами ТЛ-дозиметрии и бета-радиометрии целостной кости являются менее трудоемкая подготовка проб и возможность сохранить образец для дальнейших исследований. Недостаток этих методов состоит в том, что оба метода являются косвенными.

Проведено сравнение коэффициентов конверсии, полученных в данной работе и в ходе эксперимента на лабораторных животных. Средние значения относительной удельной активности ^{90}Sr к мощности дозы на костных поверхностях, полученные в лабораторном эксперименте, составляют 2,5±0,6 и 3,7±0,8

(Бк/г)/(мкГр/сут) для черепа и челюсти соответственно (приведено со стандартным отклонением) [3]. Из сопоставления этих значений с коэффициентами конверсии, полученными на полевом материале (табл. 2), видно, что различия являются несущественными. В то же время, стандартное отклонение коэффициента для лабораторных мышей меньше, так как в контролируемых условиях эксперимента меньше факторов, влияющих на эту величину (использована достаточно однород-

ная выборка животных, которые получили одно и то же количество ^{90}Sr).

Выводы.

1. Отработаны методы оценки удельной активности ^{90}Sr в черепе и нижней челюсти мелких млекопитающих с использованием ТЛ-дозиметрии и бета-радиометрии целостной кости. На основе сравнения с результатами радиометрии проб озоленной кости рассчитаны коэффициенты перехода к удельной активности ^{90}Sr в костях мелких млекопитающих, обитающих на территории ВУРСа. Наблюдается хорошая сходимость результатов, полученных на полевых и лабораторных животных.

2. Разработанные методы измерения позволяют оценивать накопление ^{90}Sr в костях мышевидных грызунов, подвергающихся радиационному воздействию на территории, где ^{90}Sr является определяющим фактором внутреннего облучения млекопитающих.

3. Предложенный подход к оценке активности ^{90}Sr в скелете мышевидных грызунов, обитающих на территории ВУРСа, предс-

